STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č.2: Fyzika

Optimalizace laserového svařování AISI 304 a titanu

Jakub SALAJ
Olomoucký kraj

Uničov, 2019

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č.2: Fyzika

Optimalizace laserového svařování AISI 304 a titanu

Optimalization of laser welding of AISI 304 and titanium

Autor: Jakub Salaj
Škola: Gymnázium, Uničov, Gymnazijní 257, Uničov 783 91
Kraj: Olomoucký kraj
Konzultantka: RNDr. Hana Chmelíčková
Uničov, 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Uničově, dne 5. 5. 2019, ...

Motto

„To, co se jednou naučíš, ti už nikdy nikdo nevezme."

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat RNDr. Haně Chmelíčkové za její cenné rady, ochotu a trpělivost při vedení mé odborné práce. Dále také také Mgr. Lukáši Václavkovi za pomoc při snímání mikroskopem LEXT.

Dále bych chtěl poděkovat vedení Gymnázia Uničov, které mi poskytlo značnou podporu a Mgr. Miroslavu Komsovi za jeho obětavost a individuální přístup.

Anotace

Strojírenství je velice podstatným segmentem české ekonomiky a jedním z mnoha úkonů, které provádějí české strojírenské podniky, je právě svařování. Mimo tradiční metody jsou v současné době zaváděny metody laserového svařování.

V této práci se zabývám možnostmi optimalizace parametrů pulsního Nd:YAG laseru při svařování AISI 304 a titanu s cílem nalezení nejpříhodnějších parametrů.

Tuto práci jsem vypracoval v rámci projektu Badatel Univerzity Palackého. Na práci jsem pracoval pod vedením RNDr. Hany Chmelíčkové ve Společné laboratoři optiky UP a FZÚ AV ČR.

V této práci se spojují dvě mé životní záliby, a to technika a fyzika.

Klíčová slova

svařování; pulsní laser; Nd:YAG laser; optimalizace; AISI 304; titan

Annotation

Machining is very important part of the czech economics and many of the many proceses that are performed in industrial companies is welding. Except ordinary methods are these days brought in methods of laser pulsed welding.

In this thesis I consist possiblities of optimalisation of laser beam parameters of Nd:YAG pulsed laser welding of AISI 304 and titanium with focus on finding the most suitable parameters.

I wrote this thesis with support of project "Badatel"of Palacky University. I worked on this thesis under supervision of RNDr. Hana Chmelíčková in Joint Laboratory of Optics, Palacky University and Institute of Physics of Academy of Sciences of the Czech Republic.

This thesis connects my two greatest passions: technics and physics.

Keywords

welding; pulsed laser; Nd:YAG laser; optimalisation; AISI 304; titanium

Obsah

1 Úvod **6**

2 Teoretická část **7**

2.1 Laser . . . 7

2.1.1 Elektromagnetické záření . . . 7

2.1.2 Inverze populace . . . 7

2.1.3 Stimulovaná emise . . . 9

2.1.4 Zesílení . . . 9

2.1.5 Vlastnosti laserového záření . . . 11

2.1.6 Typy průmyslových laserů . . . 12

2.2 Bezpečnost při práci s lasery . . . 13

2.2.1 Povinnosti provozovatele . . . 13

2.2.2 Bezpečnostní třídy . . . 13

2.3 Interakce materiálu s laserovým svazkem . . . 15

2.3.1 Absorpce elektromagnetického záření . . . 16

2.4 Svařování . . . 16

2.4.1 Úvod do svařování . . . 16

2.4.2 Tavné svařování . . . 16

2.4.3 Napětí a deformace . . . 17

3 Praktická část **18**

3.1 Materiál a metody . . . 18

3.1.1 AISI 304 . . . 18

3.1.2 Titan komerční čistoty třídy 1 . . . 18

3.1.3 Ti6Al-4V ELI . . . 19

3.1.4 Laser . . . 20

3.1.5 USB Mikroskop . . . 22

3.1.6 Olympus LEXT OLS5000 . . . 22

3.1.7 Metalografie . . . 22

3.2 Setup experimentu . . . 25

3.2.1 AISI 304 . . . 25

3.2.2 Titan . . . 25

3.2.3 Význam označení veličin . . . 26

4 Výsledky **27**

4.1 AISI 304 . . . 28

4.1.1 Vliv délky pulsu . . . 28

4.1.2 Vliv energie pulsu . . . 31

4.1.3 Vliv vzdálenosti od ohniska . . . 34
4.2 Titan . . . 36
4.2.1 Vliv energie pulsu . . . 36
4.2.2 Vliv délky pulsu . . . 39

5 Diskuze **43**
5.1 AISI 304 . . . 43
5.1.1 Vliv délky pulsu . . . 43
5.1.2 Vliv energie pulsu . . . 43
5.1.3 Vliv vzdálenosti od ohniska . . . 43
5.2 Titan . . . 44
5.2.1 Vliv energie pulsu . . . 44
5.2.2 Vliv délky pulsu . . . 44

6 Závěr **45**

Seznam obrázků **46**

Seznam tabulek **48**

Literatura **49**

1 Úvod

Do výzkumu jsem se pustil, protože se již od dětství pohybuji v prostředí strojírenských podniků a fascinovaly mne procesy, které zde z kusů oceli vytváří různé konstrukce. V této práci zkoumám z fyzikálního hlediska laserové svařování, proces, který by mohl v budoucnu nahradit tradiční metody svařování.

Tuto práci jsem vypracoval v rámci projektu Badatel Univerzity Palackého. Při hledání tématu jsem narazil na obsazený projekt zabývajícím se laserovým řezáním a svařováním a přesvědčil jsem paní supervizorku, RNDr. Hanu Chmelíčkovou, o opětovném otevření projektu v následujícím školním roce.

Lasery jsou již v této době staly běžnými zařízeními, které se vyskytují v téměř každé domácnosti. Lasery jsou známy každému z nás jako ukazovátka, ale již méně jako zařízení, jimiž lze svařovat, řezat, vrtat, kalit a popisovat. Byť se tato zařízení od běžných ukazovátek dosti liší, podstata je tatáž.

Cílem mé práce bylo seznámení se s fungováním laseru a s bezpečnou manipulací s nimi, dále s interakcí materiálu s laserovým svazkem a s laserovým svařováním, které shrnuji v teoretické části. Hlavním cílem bylo nalezení optimálních parametrů laserového svařování oceli AISI 304 a titanu. A s využitím nalezených optimálních parametrů efektivní svaření dvou plechů tupým svarem.

Zkoumanými parametry jsou délky pulsu, energie pulsu a šířka svazku, tedy ty, které jsou klíčové k dosažení požadovaných vlastností svaru např. rozměrům a vzhledu. Optimalizace těchto parametrů laserového svařování probíhá experimentální metodou pozorováním jejich vlivu na kvalitu svaru.

V této práci se ovšem zabývám pouze pulsním laserovým svařováním. V případě svařování jsou na svary kladeny vysoké nároky v ohledech kvality, rychlosti, efektivity a preciznosti. Právě tyto nároky se daří naplňovat laserovému svařování, a proto stále více firem začíná ve svých výrobních procesech využívat právě lasery, kterým se v poslední době na tomto poli dostává zvýšené pozornosti, protože svou rychlostí a kvalitou překonává současně používané odporové svařování. V této práci se zabývám svařování tenkých plechů, na které je vhodné používat pulsní laserové svařování, protože nabízí precizní dávkování energie, které snižuje riziko vzniku deformací a napětí. Nevýhodou je vyšší úvodní investice a v případě pulsních laserů i relativně nízká maximální tloušťka materiálu cca 2 mm.

Vizí této práce je rozšířit povědomí o laserovém svařování, demonstrovat využití a metody optimalizace, aby bylo v budoucnu jednodušeji zařaditelné do běžné praxe a dosáhlo se rychlejší, efektivnější a levnější výroby.

2 Teoretická část

2.1 Laser

Historie laseru započala roku 1917, když Albert Einstein ukázal, že mimo jevů jako spontánní emise a absorpce, musí existovat též další jev - stimulovaná emise. V roce 1939 ruský fyzik V. A. Fabrikant poukázal na možnost použití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím, ve kterém je vytvořen nerovnovážný stav. Poprvé byla stimulovaná emise využita k zesilování záření v mikrovlnné oblasti. Realizací maseru (**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) byl iniciován vznik nového vědního oboru - kvantové fyzice [1].

Laserový svazek je v podstatě koherentní, kolimovaný a monochromatický svazek elektromagnetického záření s vlnovou délkou od infračerveného až do ultrafialového spektra. Lasery postupem času našly mnoho způsobů využití, např. v elektrotechnice, strojírenství, medicíně, elektronice, kde se využívá jedna nebo více základních vlastností laseru [2].

2.1.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je složeno vlnami oscilujícího elektrického a magnetického pole. Tyto dvě složky jsou na sebe navzájem kolmé a také jsou kolmé na vektor šíření vlny. Z tohoto důvodu se k popisu šíření elektromagnetické vlny používá pouze složka oscilace elektrického pole. Jestliže se vlna šíří pravidelně, nazývá se polarizovaná. Polarizovaná vlna se šíří v jedné rovině, takže vlna šířící se směrem x, pak vlna osciluje v x-y rovině. Na druhou stranu nepolarizované světlo se šíří všemi směry.

Vlna se dá popsat veličinami jako vlnová délka, frekvence, energie. Na základě těchto veličin můžeme elektromagnetické záření rozdělit do specifických skupin. Elektromagnetické spektrum se dělí na rádiové vlny, mikrovlny, infračervené světlo, viditelné světlo, ultrafialové světlo, rentgenové záření a gamma záření. Stanovit přesnou hranici dvou sousedících spekter je náročné, a proto jsou vyjádřeny přibližnými hodnotami.

Pokusíme-li se ovšem popsat některé jevy jako fotoelektrický jev s tím, že elektromagnetické záření se šíří jako vlna, tak zjistíme, že toho nejsme schopni. K popisu některých jevů se na základě kvantové teorie předpokládá, že elektromagnetické záření je svazek částic zvaných fotony [2].

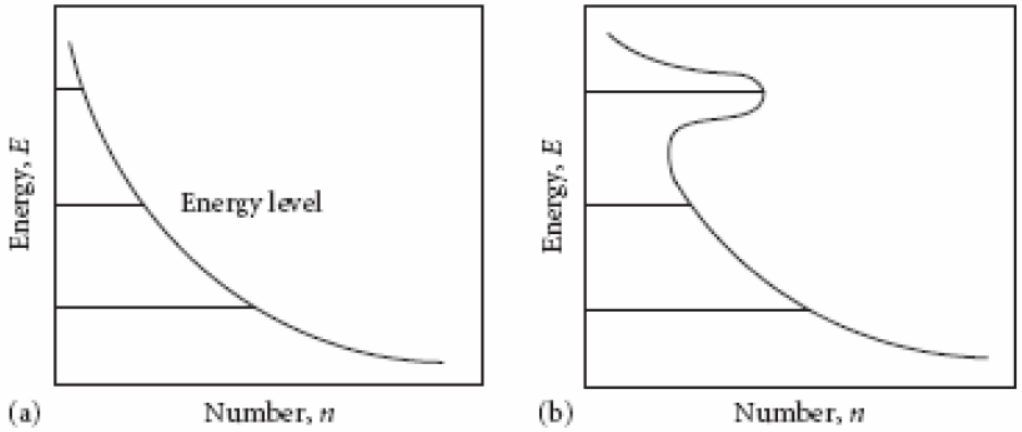
2.1.2 Inverze populace

Inverze populace umožňuje existenci stimulované emise, která je naprosto stěžejní podmínka existence laserů. V rovnovážném stavu se elektrony rozmisťují do rozdílných energetických hladin podle Boltzmannova zákona (viz rovnice 1, kde N_i je počet částic v hladině, E_i je energie dané hladiny, k je Boltzmanova konstanta ($= 1.38064852.10^{-23}\ J.K^{-1}$) a T je termodynamická teplota).

Podle Boltzmannova zákona jsou vyšší energetické hladiny obsazeny méně než nižší (viz obr. 1a). Počet elektronů ve vyšších energetických hladinách exponenciálně klesá s energií. Inverze populace

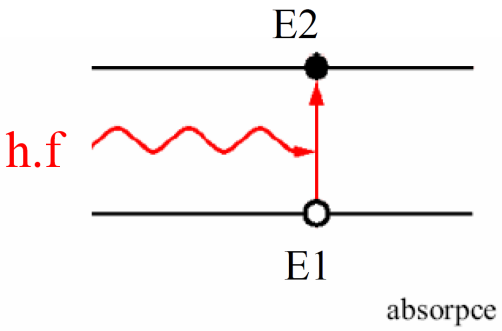
tedy odpovídá nerovnovážnému stavu, kdy vyšší energetické hladiny mají více elektronů než nižší (viz obr. 1).

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{-(E_2-E_1)}{k.T}} \tag{1}$$

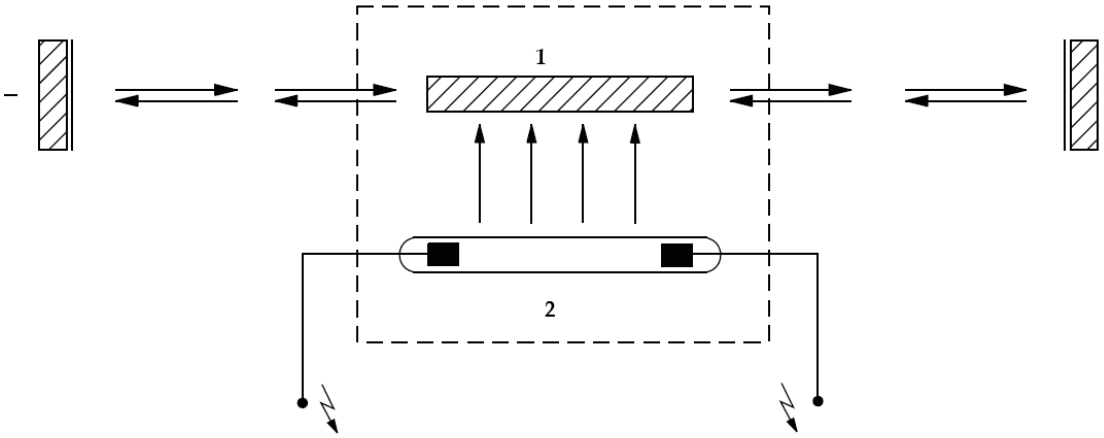


Obrázek 1: Grafy počtu částic v jednotlivých energetických hladinách při standardní populaci a inverzi populace (Převzato z [3])
(a): Standardní distribuce populace, (b): Inverze populace

Pomocí čerpání dosáhneme stavu inverze populace. K vysvětlení tohoto konceptu je často využívaný koncept dvouhladinového systému, kdy se předpokládají pouze dva energetické stavy, ale v praxi je zapotřebí tří nebo čtyř energetických stavů k dosažení inverze populace a následně stimulované emise [2]. První stav je stabilní. Přechod z prvního na druhý stav (viz obr. 2) dochází absorpcí fotonu z čerpacího zařízení částicí aktivního prostředí (viz obr. 3).



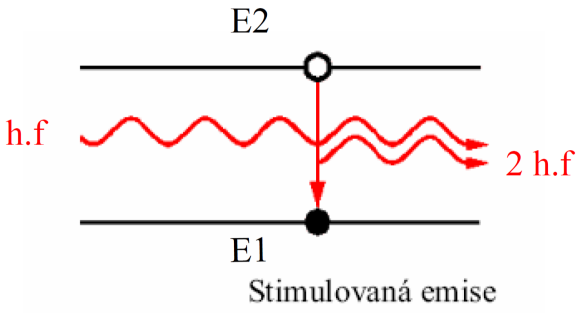
Obrázek 2: Schéma absorpce fotonu v dvouhladinovém systému (převzato z [3])



Obrázek 3: Schéma čerpacího zařízení a aktivního prostředí (Převzato a upraveno z [4])
1: Aktivní prostředí, 2: Čerpací zařízení

2.1.3 Stimulovaná emise

Při stimulované emisi příchozí foton reaguje s excitovanou částicí. Příchozí foton způsobuje uvolnění záření, převedením atomu do nižší energetické hladiny. Výstupní záření má stejnou frekvenci, směr šíření a fázi jako příchozí foton (viz obr. 4) [2].



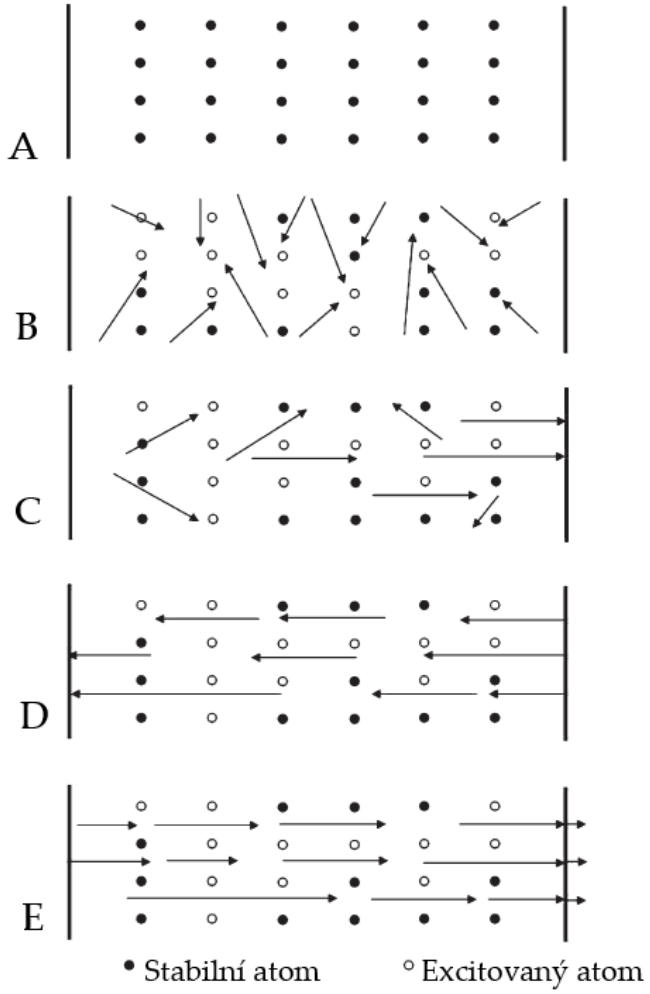
Obrázek 4: Schéma stimulované emise fotonu v dvouhladinovém systému (Převzato z [3])

2.1.4 Zesílení

Stimulované fotony mají stejnou fázi a polarizaci a přidávají se k příchozímu fotonu způsobující růst amplitudy. Zesílení je dosaženo v rezonátoru a soustavě dvou zrcadel kolmých na osu rezonátoru. Aktivní prostředí je umístěno mezi zrcadly. V běžné praxi je jedno ze soustavy zrcadel plně odrazné (s odrazností blízko 100 %) a druhé je částečně odrazné umožňující výstup svazku z aktivního prostředí.

Když je laser vypnutý, aktivní prostředí obsahuje částice v neexcitovaném stavu (viz obr. 5a).

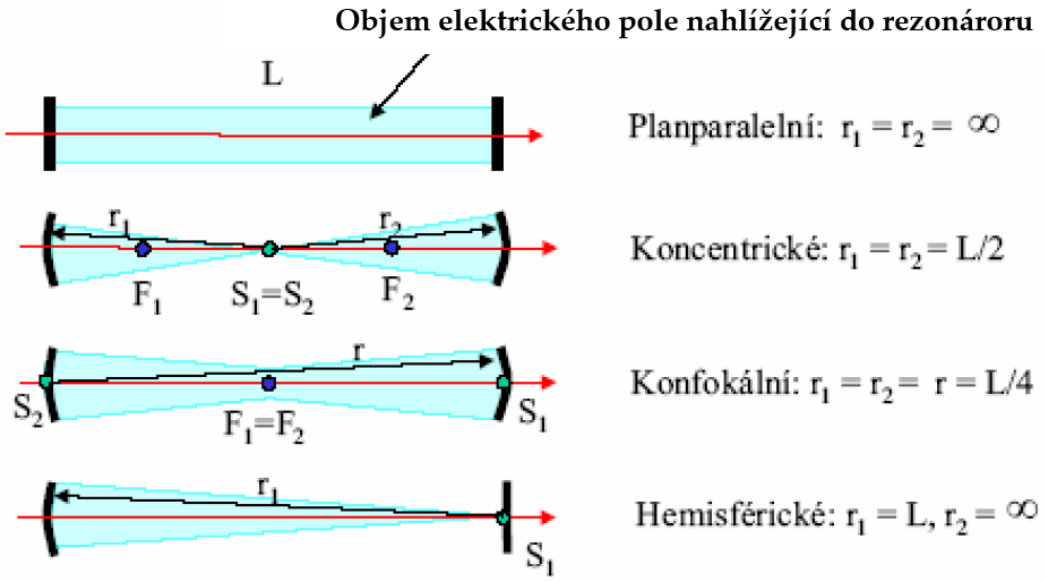
Po zapnutí laseru je excitace částic dosažena čerpáním a je okamžitě následována stimulovanou emisí (viz obr. 5b). Intenzita stimulované emise vzrůstá s klesající vzdáleností k zrcadlu ve směru šíření (viz obr. 5c). Další zesílení je dosaženo opětovným odrazem fotonů zpět do aktivního média (viz obr. 5d). Fotony jsou opakovaně odráženy zpět do aktivního média stimulující další a další emise a vyúsťující ve laserový svazek s vysokou intenzitou vystupující z částečně propustného zrcadla (viz obr. 5e).



Obrázek 5: Zapínání laseru (Převzato z [2])

K započetí a udržení procesu zesilování je potřeba, aby dodaná energie byla větší než ztráty např. na krajích zrcadel, absorpci energie, srážkami v aktivním médiu, atd.

V předchozí diskusi o zesílení stimulované emise jsme předpokládali, že použitá zrcadla byla rovná. Nicméně, praxe ukázala, že jiná uspořádání poskytují mnohé výhody na rozdíl od rovných zrcadel. Při konstrukci je potřeba vzít do úvahy mimo objemu aktivního média, které jsou schopna zrcadla pokrýt, také stabilitu, tedy odolnost proti mírným nesrovnalostem a odchylkám. Stabilita je definována jako schopnost udržet fotony v komoře i po několika odrazech. Například rovná zrcadla mají výhodu, že pokrývají celý objem aktivního média, ale nevýhodou je, že každá odchylka od osy, způsobí odraz fotonům mimo komoru rezonátoru. Oproti tomu kulová zrcadla jsou stabilní, ale zase nepokrývají velký objem aktivního média. Na obrázku 6 jsou ukázány základní typy rezonátorů, kde r_i je poloměr, l_i je délka a F_i je ohnisko, S_i je střed křivosti zracadel [2].



Obrázek 6: Základní typy rezonátorů (Převzato z [5])

2.1.5 Vlastnosti laserového záření

Monochromatičnost

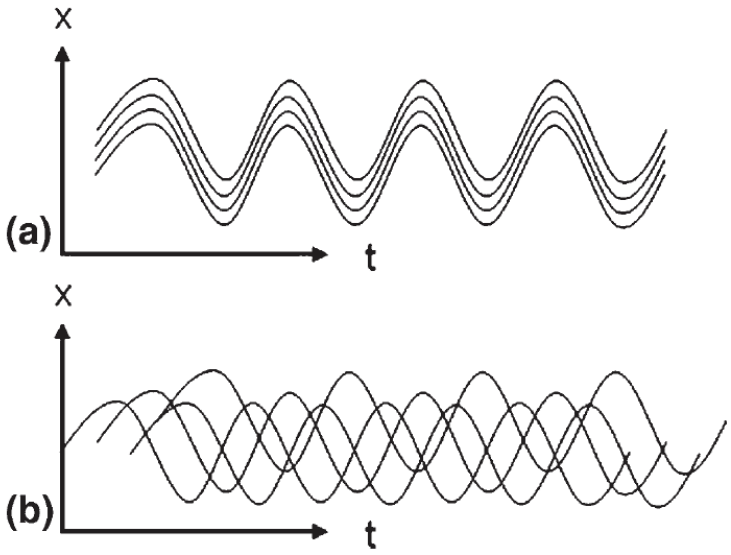
Monochromatičnost je stěžejní vlastnost laserového svazku. Znamená, že laserový svazek má velice úzké frekvenční spektrum, které je zapotřebí k účinnému zesílení svazku a určení správné délky rezonátoru, tedy vzdálenosti mezi dvěma zrcadly, která je rovna násobku poloviny vlnové délky [2].

Kolimace

Kolimace svazku je způsobena původem svazku. Kolimace je pojem pro nízkou rozbíhavost svazku, a proto může být laserový svazek fokusován do malého prostoru i na velké vzdálenosti. Běžně se rozbíhavost svazku pohybuje mezi 0,2 až 10 miliradiány [2].

Koherence svazku

Koherence svazku znamená, že fáze všech částic je identická ve stejném bodě v čase (viz obr. 7 a). Koherence svazku se dá využít v mnoha oblastech např. inferometrii a holografii [2].



Obrázek 7: Koherence záření (Převzato z [2])
(a): Časově a prostorově koherentní záření, (b): Nekoherentní záření

2.1.6 Typy průmyslových laserů

Od prvního zkonstruovaného laseru, jehož aktivním materiálem byl rubín, se technologie posunula a nyní máme více možností, které aktivní materiály můžeme při konstrukci použít. Lasery se zpravidla dělí do čtyřech hlavních skupin podle použitého materiálu na pevnolátkové lasery, plynové lasery, kapalinové lasery, a polovodičové lasery [2].

Pevnolátkové lasery

Po prvním laseru s rubínovým krystalem bylo vyzkoušeno mnoho jiných přechodných prvků. Jeden z prvních objevených materiálů byl neodymem dopovaný yttrium-alluminium peroskit - Nd:YAP ($YAlO_3{:}Nd^{3+}$) a v osmdesátých letech krystal $Cr{:}BeAl_2O_4$. Ovšem historicky nejúspěšnějším se stal iont Nd v matrici yttrium alluminium granátu tedy Nd:YAG ($Y_3Al_5O_{12}{:}Nd^{3+}$)

Pevnolátkový laser je laser, jehož aktivním prostředím je dielektrikum - pevná opticky propustná látka - matrice obsahující poměrně malou koncentraci stechiometricky uložených iontů aktivátory. Všechna aktivní prostředí pevnolátkových laserů jsou současně účinnými luminofory [1].

V případě pevnolátkových laserů je matrice základním materiálem, jímž je určena většina technických, chemických i fyzikálních vlastností. Materiál matrice musí být chemický stabilní, tepelně odolný, mechanicky pevný a snadno mechanicky opracovatelný, dále také musí být opticky homogenní a průzračný pro budící i generované záření.

Aktivátory jsou atomy nebo ionty, které jsou umístěné v matrici, a jsou zúčástněny v procesu generování optického záření [1].

Kapalinové lasery

V případě kapalinových laserů je aktivním prostředím roztok organických barviv popř. speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Běžnější jsou ovšem lasery s aktivním prostředím tvořeným organickými barvivy.

Aktivní prostředí kapalinových laserů je tvořeno z velké části organickými barvivy rozptýlenými v rozpouštědle. Nejběžnější jsou tato rozpouštědla: voda, ethylalkohol, methylalkohol, toluen, benzen, aceton, cyklohexan a glycerin.

Nejefektivnější barviva jsou rozdělena do následujících osmi kategorií: xanteny, polymetiny, oxaziny, kumariny, antraceny, acridiny, aziny, a ftalocyaniny.

Kapalinové lasery jsou používány zejména ve spektroskopii, z důvodu možnosti přesného ladění vlnové délky [1].

Plynové lasery

Plynové lasery mají aktivní prostředí v plynné fázi. Inverze populace je dosažena některou ze složek plynu (atom, molekula, iont). Plynové lasery pracují zpravidla v kontinuálním režimu. Výhodou plynových laserů je menší deformace svazku v porovnání s lasery s kondenzovaným prostředím, dále se vyznačuje vysokou stabilitou výstupní frekvence a malou rozbíhavostí. Nevýhodou jsou větší rozměry [1]. Mezi nejčastěji zastoupené plynové lasery patří CO_2 laser.

Polovodičové lasery

U polovodičového laseru je namísto běžného rezonátoru použita dioda. Výhodou polovodičových laserů je jejich kompaktnost, dále také možnost přeladit jejich vlnovou délku a především, také velký zisk. Nevýhodou je závislost paramerů na teplotě aktivního polovodiče a rozbíhavost generovaného záření [1].

2.2 Bezpečnost při práci s lasery

Provoz laseru je upravován zákonem 258/2000 Sb. [6] dále prováděcím předpisem - nařízením vlády 291/2015 Sb. [7] a také technickou normou ČSN EN 60825-1 [8]. Na provoz jsou kladeny nároky z důvodu možnosti způsobení úrazu.

2.2.1 Povinnosti provozovatele

Provozovatel laseru je povinen řídit se nařízeními, které mu ukládá zákon [6] a norma [8]. Ty mu na základě bezpečnostní třídy, která se určuje na základě vlastností laseru (např. maximálního výkonu, atp.), ukládají zajistit ochranné pomůcky, výstražné tabulky, varovná světla, provozní řád, oddělovací boxy, atd.

2.2.2 Bezpečnostní třídy

Z důvodů širokého rozsahu velikostí výkonů, impulsních charakteristik a možných vlnových délek jsou nebezpečí, která vznikají při jejich používání velice různorodá, a proto nelze lasery považovat za jednu skupinu, pro kterou lze použít stejná bezpečnostní opatření.

Klasifikace laserových zařízení je založena na stanovení úrovně přístupné emise a porovnání těchto úrovní s limity přiřazeným k jednotlivým třídám.

Dle normy [8] známe následují třídy: 1, 1M, 1C, 2, 2M, 3R, 3B, 4.

Lasery se do tříd zařazují dle normy [8] podle různých kritérií.

Třída 1

Do třídy 1 spadají lasery, které jsou bezpečné během používání, včetně dlouhodobého přímého sledování laserového svazku i za použití optických pomůcek. Třída 1 také zahrnuje vysokovýkonné

lasery, které jsou zcela zakrytovány tak, že potenciálně nebezpečně záření není během používání přístupné.

Přímý pohled do laserového svazku třídy 1 může způsobit oslnění zejména při nízké úrovni okolního osvětlení [8].

Třída 1M

Lasery, které jsou bezpečné během používání, včetně dlouhodobého přímého sledování laserového svazku, ale hodnota maximální přípustné dávky ozáření může být překročena použitím optických pomůcek.

Přímý pohled do laserového svazku třídy 1 může způsobit oslnění zejména při nízké úrovni okolního osvětlení [8].

Třída 1C

Laserová zařízení, jejichž účelem je přímá aplikace laserového záření na pokožku nebo vnitřní tkáně za účelem lékařských, terapeutických nebo kosmetických metod. I přesto, že zařízení může mít úroveň třídy 3R, 3B nebo 4, ozáření oka je zabráněno za pomoci jednoho nebo více technických prostředků [8].

Třída 2

Do třídy 2 spadají lasery, které vyzařují viditelné záření v rozsahu od 400 nm do 700 nm a která jsou bezpečná při chvilkovém ozáření, ale nebezpečná při záměrném pohledu do svazku.

Použití optických pomůcek nezvýší nebezpečí poškození oka.

Laserovým svazkem třídy 2 mohou být způsobeno: oslnění, zábleskova slepota nebo přetrvávající zrakové vjemy, zejména při nízké úrovni okolního osvětlení. Dočasné narušení vidění nebo úleková reakce může představovat riziko zejména v oblasti bezpečnosti práce např. při práci ve výškách, se stroji, na vysokém napětí.

Uživatelé jsou výstražnými štítky upozorněni, aby se nedívali upřeně do svazku a využili obranné reakce pohybem hlavy nebo zavřením očí [8].

Třída 2M

Lasery, které vyzařují viditelný svazek, a jsou bezpečné pro krátkodobá ozáření pouze pro oči bez optických pomůcek.

Použití optických pomůcek zvyšuje nebezpečí poškození oka.

Uživatelé jsou výstražnými štítky upozorněni, aby se nedívali upřeně do svazku a využili obranné reakce pohybem hlavy nebo zavřením očí [8].

Třída 3R

Laserová zařízení vyzařující záření, které může překročit maximální přípustnou dávku ozáření při přímém sledování uvnitř svazku, ale riziko je ve většině případů relativně nízké. Protože je riziko nižším, nejsou kladeny takové požadavky na výrobce a opatření pro uživatele jako u třídy 3B.

Laserová zařízení by měla být pouze tam, kde je přímý pohled do svazku nepravděpodobný [8].

Třída 3B

Lasery, které jsou při pohledu včetně nahodilých krátkodobých ozáření do svazku nebezpečná. Sledování difusních odrazů je bezpečné. Lasery ze třídy 3B mohou vytvářet malá poškození pokožky

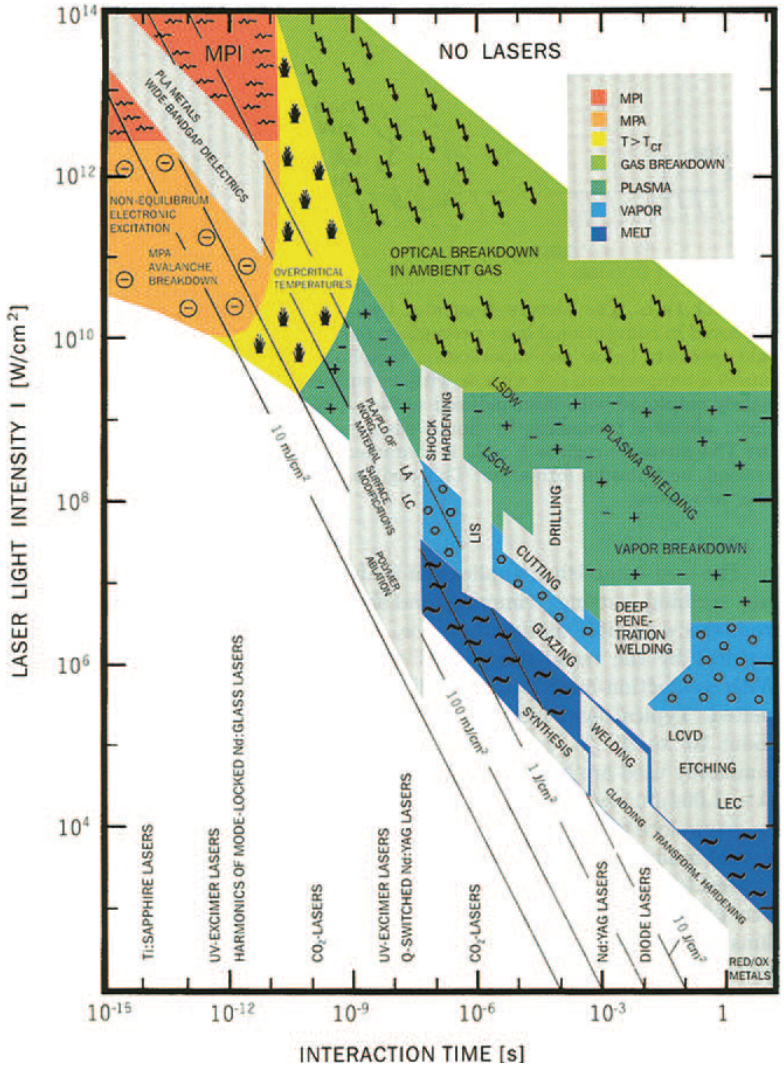
a přestavují riziko zapálení hořlavých materiálů, ale pouze tehdy je-li svazek zaostřen nebo má malý průměr [8].

Třída 4

Laserová zařízení, u kterých je pohled do svazku, ozáření pokožky i pozorování difusního odrazu nebezpečné. Tyto lasery představují riziko vzniku požáru [8].

2.3 Interakce materiálu s laserovým svazkem

Abychom byli schopni správně porozumět možnostem a limitům laserového svařování, musíme se seznámit s procesy, které se probíhají během interakce laserového svazku a materiálu. Když laserový svazek dosáhne povrchu materiálu, mohou nastat tyto případy: odraz, pohlcení, lom, rozptyl a přenos. Požadovaným procesem je ovšem pohlcení (tzv. absorpce) záření. Absorpce zahájí v materiálu procesy např. ohřev, tavení, vypařování, atd. Tyto procesy jsou základem nejen pro laserové svařování, ale i pro další metody zpracování materiálů laserem.



Obrázek 8: Závislost interakčního času a energie na metodě zpracování. (Převzato z [2])

Další procesy závisejí na vlastnostech interagujícího materiálu a také vlastnostech elektromagnetického záření. Mezi vlastnosti interagujícího materiálu řadíme součinitel tepelné vodivosti, hustotu, měrné skupenské teplo, měrnou tepelnou kapacitu a mezi vlastnosti elektromagnetického záření zařazujeme např. intenzitu, vlnovou délku, polarizaci, interakční čas, úhel dopadu, atd. [2].

2.3.1 Absorpce elektromagnetického záření

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1, laserový svazek jsou elektromagnetické vlny. Absorpce toho záření lze popsat jako interakci mezi elektromagnetickým zářením a elektrony interagujícího materiálu. Elektromagnetické záření interaguje pouze s elektrony, protože těžší části nejsou schopny reagovat s vysokými frekvencemi elektromagnetického záření.

Když elektromagnetické záření prochází elektronem, vyvíjí sílu, která uvádí elektron do pohybu ve směru elektromagnetického pole. Absorbované záření způsobuje zvýšení energie nabitých částic např. kinetickou energii volných elektronů. Tímto procesem se materiál zahřívá. Přeměna světla na teplo a její následné vedení může vyústit v následující fyzikální procesy v materiálu: ohřev, tání a výpar materiálu. Následně se může ionizací par laserovým svazkem, vytvořit plasma. Všechny tyto procesy mají své využití ve zpracování materiálů. Na základě nastavení parametrů může laser sloužit ke svařování, řezání, vrtání, povrchovému kalení nebo gravírování [2].

2.4 Svařování

2.4.1 Úvod do svařování

Svařování je jedním z procesů spojování kovů a slitin, jehož výsledkem je vznik pevného, přímého a nerozebíratelného spojení části v celek. Svařování nahradilo méně progresivní technologie, jakými je např. nýtování, dále umožnilo výrobu kombinovaných konstrukcí a opravy poškozených součástí i zmetků ve výrobě. Svařování urychluje a zvyšuje hospodárnost výrobního procesu možností mechanizace a automatizace existujících způsobů svařování a nově vyvinuté metody svařování umožňují značnou úsporu materiálu. Svařenec může mít 50 % nižší hmotnost něž stejná součást vyrobená litím.

Použití technologie svařování má též nevýhody: vznik pnutí uvnitř základního materiálu působením zvýšené teploty, které může způsobit deformaci a jeho struktura i mechanické vlastnosti se negativně mění; ve svaru mohou vznikat vnitřní vady, které zeslabují nosný průřez svaru [9].

2.4.2 Tavné svařování

Tato technologie vytváří svar působením tepelné energie. Působení tepelné energie plamene, elektrického oblouku, laserového svazku, apod., způsobí natavení stykových ploch materiálu spojovaných částí a zalitím vzniká svar [9].

Výsledná jakost svarových spojů je bezprostředně ovlivněna rozložením teploty ve svarku v průběhu svařování, po svařování i v průběhu následného zpracování. V procesu vytváření svarového spoje u metod tavného svařování probíhají následující dílčí reakce:

- Lokální natavení svarových ploch a postupné tavení přídavného materiálu;
- Fyzikálně-metalurgické procesy ve svarové lázni, metalurgické reakce mezi roztaveným kovem a okolním prostředím, absorpce plynů;
- Formování celkové geometrie svarové lázně a svaru působícími silami a účinky proudění;
- Krystalizace svarové lázně a ochlazení svaru odvodem tepla do okolního prostředí a základního materiálu.

Všechny dílčí procesy se podílejí na celkové kvalitě výsledného svarového spoje. [10]

2.4.3 Napětí a deformace

Napětí ve svařovaných dílech a jejich deformace je zapříčiněna přívodem energie do místa spoje a odvodem tepla do základního materiálu. Nelze jim zabránit poněvadž jsou zákonitým jevem při svařování, nicméně na základě poznatků je možno napětí a deformace omezit nebo přesunout do méně exponovaných míst. Deformace a napětí spolu přímo souvisejí. Je-li deformace dílu omezena, obvykle dojde ke zvýšení svarových napětí.

3 Praktická část

3.1 Materiál a metody

3.1.1 AISI 304

AISI 304 je chrom-niklová austentická ocel. Jde o nejrozšířenější korozivzdornou ocel na trhu. Má nízký obsah uhlíku, a proto je dobře svařitelná. Má dobrou tažnost za studena. Při tváření se může zpevňovat. Lze ji dobře ohýbat, ohraňovat a leštit. Odolává teplotám do (300–350) °C. Obrobitelnosti není dobrá, ale dá se obrobit při použití naostřených nástrojů. Ocel je odolná proti vodě, vodní páře, vlhkosti vzduchu, jedlým kyselinám a slabým organickým i anorganickým kyselinám. Odolává povětrnostním podmínkám mimo přímořských oblastí a mimo prostředí, kde je vyšší koncentrace agresivních chemických látek. Má široké spektrum použití: potravinářský průmysl (např. mlékárenství, pivovarnictví, vinařství), chemický průmysl, farmaceutický průmysl, chemický průmysl, automobilový a letecký průmysl [11].

Má lepší protikorozní vlastnosti než AISI 302. Je nemagnetická, ale za studena je mírně magnetická [12].

Při experimentech byly použity plechy o šířce 0,6 mm.

Složení

Prvek:	C	Cr	Fe	Mn	Ni	P	S	Si
% hmotnosti	$< 0,08$	$18 - 20$	$66.345 - 74$	< 2	$8 - 10.5$	< 0.045	< 0.03	< 1

Tabulka 1: Hmotnostní obsah složek AISI304 [12]

Fyzikální vlastnosti

Hustota	8 000 $kg.m^{-3}$
Teplota tání	1 450 °C
Teplotní roztažnost	$17.2.10^{-6}$ K^{-1}
Modul pružnosti	193 GPa
Tepelná vodivost	16.2 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Rezistivita	$0.072.10^{-6}$ $\Omega.m$

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti AISI304 [13]

3.1.2 Titan komerční čistoty třídy 1

Při experimentech s titanem v sadě X byl používán komerčně čistý titan třídy 1 (zkr. Ti CP Gr. 1) Titan nabízí optimální kujnost a tvarovatelnost za studena. Dále se vyznačuje pevností,

vysokou houževnatostí a výbornou svařitelností. Vzhledem k tomu, že obsahuje pouze jednu fázi, mikrostruktura tedy není závažně ovlivněna svařovacími teplotami. Mechanické vlastnosti správně vyrobeného svaru jsou stejné nebo dokonce přesahují vlastnosti původního materiálu. Je korozivzdorný v oxidačních a mírně redukčních prostředích [14].

Při experimentech byly použity plechy o šířce 1,2 mm.

Složení

Prvek:	O	N	C	H	Fe	Ti	Stopové prvky
% hmotnosti	$< 0,18$	$< 0,03$	$< 0,08$	$< 0,015$	$< 0,2$	Poměr	$< 0,4$

Tabulka 3: Chemické složení Ti CP Gr. 1 [14]

Fyzikální vlastnosti

Hustota	4 510 $kg.m^{-3}$
Teplota tání	1 670 °C
Modul pružnosti	103 GPa
Tepelná vodivost	$20,8$ $W.m^{-1}.K^{-1}$

Tabulka 4: Fyzikální vlastnosti Ti CP Gr. 1 [14]

3.1.3 Ti6Al-4V ELI

Při experimentech s titanem v sadě Z byla využita $(\alpha + \beta)$titanová slitina. Tato slitina vyniká odolností, pevností, vysokou houževnatostí a výbornou svařitelností. Často nahrazuje těžší a méně cenově efektivní materiály. Využití této slitiny zlevňuje a zlepšuje vlastnosti výrobku.

Mimo využití v leteckém, automobilním, chemickém průmyslu je tato slitina využívána v medicíně díky své biokompatibilitě obzvláště, když je nutný přímý kontakt s kostí nebo tkání.

Při experimentech byly použity plechy o šířce 1,2 mm.

Složení

Prvek:	O	N	C	H	Fe	Al	V	Ti
% hmotnosti	$< 0,13$	$< 0,05$	$< 0,08$	$< 0,012$	$< 0,25$	$5,5 - 6,5$	$3,5 - 4,5$	Poměr

Tabulka 5: Chemické složení titanové slitiny Ti6Al-4V [15]

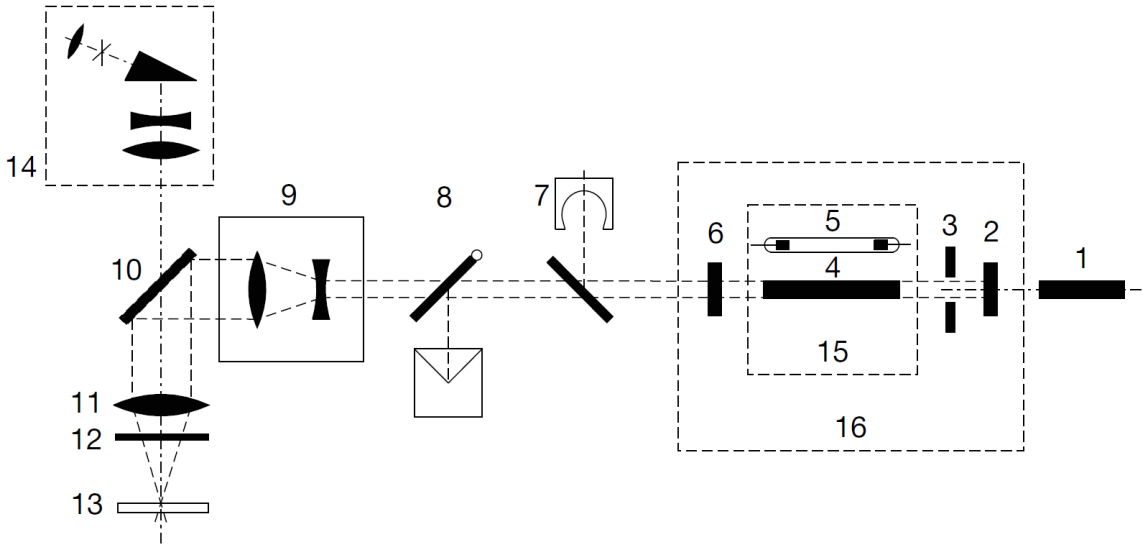
Fyzikální vlastnosti

Hustota	4 430 $kg.m^{-3}$
Teplota tání	1604 - 1660 °C
Modul pružnosti	113,8 GPa
Tepelná vodivost	$6,7$ $W.m^{-1}.K^{-1}$

Tabulka 6: Fyzikální vlastnosti Ti6Al-4V [16]

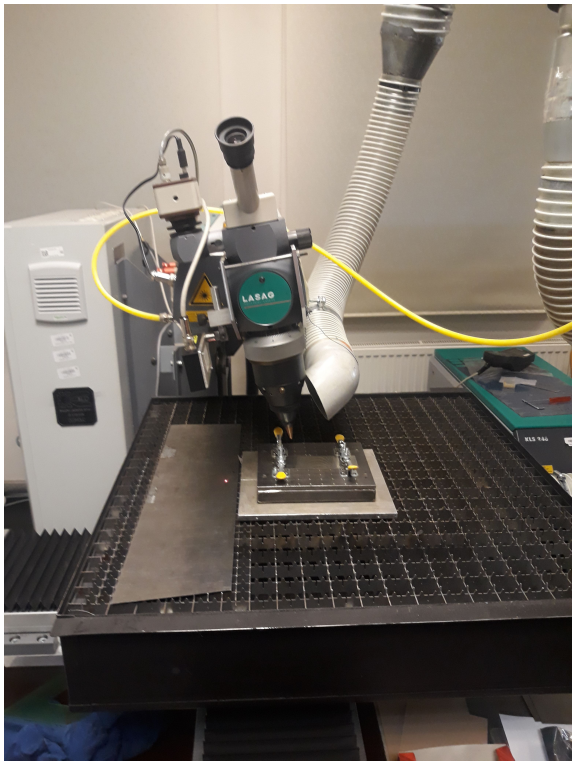
3.1.4 Laser

Při experimentech byl použit pulsní Nd:YAG laser LASAG KLS 246 s vlnovou délkou 1 064 nm. Je to průmyslový laser bezpečnostní třídy 4. V laseru byl nastaven základní rezonátor (viz obrázek 9 součást č.6) s teoretickým průměrem svazku v ohnisku 0,6 - 0,76 mm, který byl fokusován čočkou 100 mm. Z důvodu ochrany čočky a lepší efektivity svařování na jsme zvolili náklon hlavy 10°, jak je vidět na obr. 11. Pracovní materiál byl umístěn na x-y stole ve speciálním úchytu (viz obr 10)



Obrázek 9: Optický systém laseru LASAG. (Převzato a upraveno [4])
1: Pilotní červený laser, 2: Koncové zrcadlo (100 % odrazivost laserového svazku), 3: Clonka, 4: Nd:YAG krystal, 5: Kryptonová výbojka, 6: Výstupní zracadlo (částečně propustné), 7: Detektor svazku, 8: Závěrka a pohlcovač svazku, 9: Expandér svazku (volitelné), 10: Zrcadlo, 11: Fokusační čočka, 12: Ochranné sklo, 13: Pracovní materiál, 14: Okulár, 15: Optická komora, 16: Rezonátor.

Obrázek 10: Nastavení pracovního materiálu na x-y stole ve speciálním úchytu pod hlavou laseru.



Obrázek 11: Náklon hlavy laseru.

Nastavitelné parametry

Parametr	Rozsah
Budící napětí	(150 - 400) V
Frekvence	(0,1 - 1000) Hz
Energie pulsu	0,1 mJ - 30 J
Délka pulsu	(0,1 - 20) ms

Tabulka 7: Nastavitelné parametry laseru LASAG 246

3.1.5 USB Mikroskop

Ke standardnímu pozorování byl využit USB mikroskop od výrobce NewBrand s deklarovaným zvětšením mezi 10x a 300x. Výrobce deklaruje rozlišení snímače na 5 megapixelů. Výsledné snímky byly zpracovány softwarem Microcapture Pro.

3.1.6 Olympus LEXT OLS5000

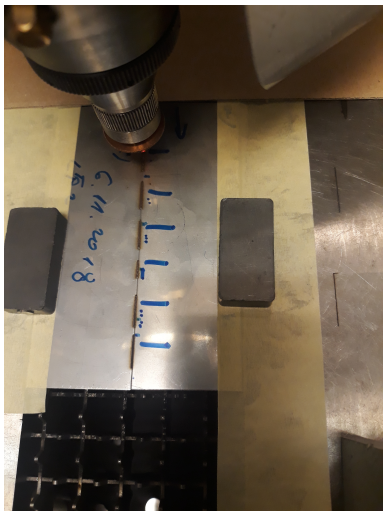
Pro detailnější pozorování bylo použito mikroskopu Olympus LEXT OLS500. Tento mikroskop pracuje se zvětšením 54x - 17280x se zorným polem mezi 15 μm a 5120 μm. Mikroskop využívá laseru k vytvoření 3D obrazu. Laser má vlnovou délku 405 nm a maximální výkon 0,95 mW a spadá do bezpečnostní třídy 2. Snímací čip má rozlišení 36 megapixelů a vytváří snímky v rozlišení 4K.

3.1.7 Metalografie

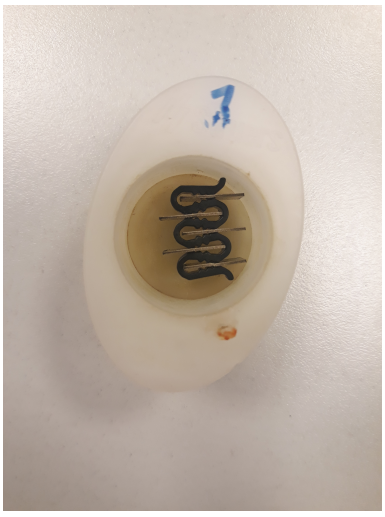
K detailnímu prozkoumání kvality svaru, bylo nutné je prozkoumat metalografickou analýzou. V případě AISI 304 lze metalografickou analýzu udělat relativně snadno ve srovnání s titanovými slitinami a obzvláště čistým titanem.

Příprava vzorku

Vzorky byly nařezány laserem na plíšky (viz obr. 12) o rozměrech 14 mm x 10 mm a uchyceny do úchytu Struers MultiClips a vloženy do formy Struers FixiForm, jak je možné vidět na obr. 13.



Obrázek 12: Plech připravený k řezání



Obrázek 13: Vzorky ve formě

Zalití pryskyřicí

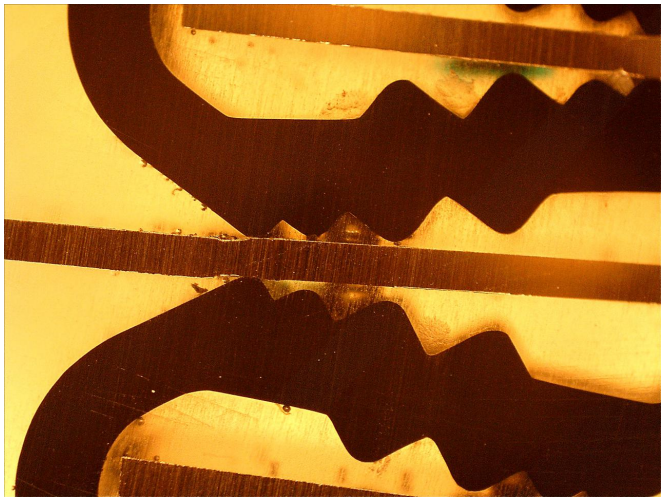
Další fází je zalití vzorku pryskyřicí. K tomuto úkonu byl použit set Struers Specifix-20kit. Pryskyřice byla 3 minuty míchána s vytvrzovacím činidlem v objemovém poměru 24:5. Dále byla ponechána 2 minuty odstát a následně je pryskyřicí zalit vzorek ve formě. Zalitá forma se nechá minimálně 8 hodin tuhnout.

Broušení

Dále se vzorek za pomoci brusných koutoučů SiC s P80 - P2400 od výrobců Hermes a Struers brousí. Proces probíhá tím způsobem, že vzorek je střídavě broušen v jednom a na něm kolmém směru a postupně stoupající jemností.

U titanu se využívají kotouče SiC s P320 - P1200.

Obrázek 14: Pohled na vzorek pod USB mikroskopem. Brusný kotouč P-1200, směr původní.

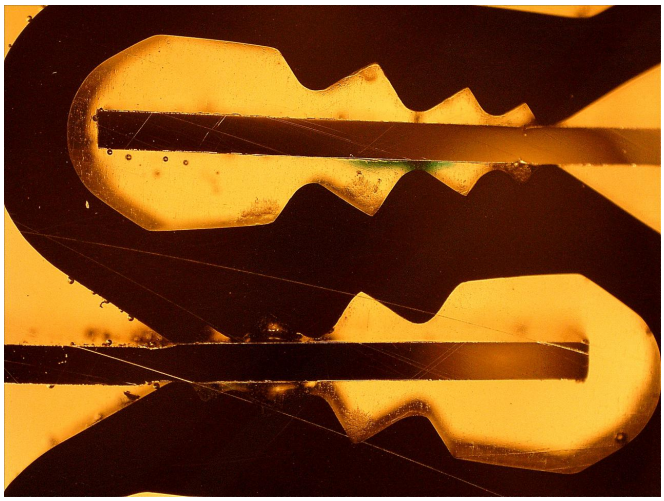


Obrázek 15: Pohled na vzorek pod USB mikroskopem. Brusný kotouč P-2400, směr kolmý.

Leštění

Po přebroušení brusným diskem s nejvyšší jemností je disk nahrazen látkou, na kterou je nanesena diamantová suspenze Struers DiaDuo 6 μm a následně ještě mikroplyšovým kotoučem a suspenzí Struers DiaDuo 1 μm.

V případě titanu se nevyužívá diamantová suspenze nýbrž koloidní křemík.



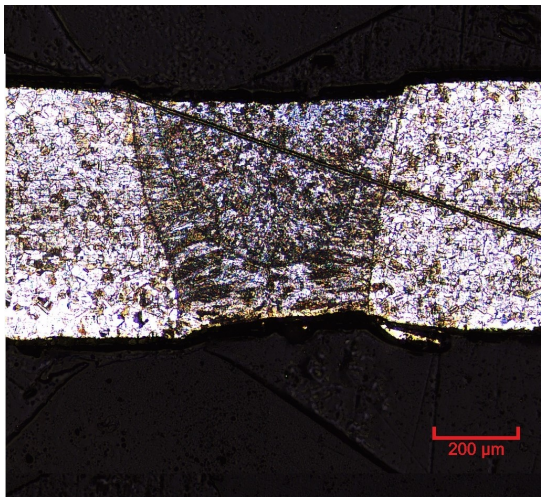
Obrázek 16: Pohled na vzorek pod USB mikroskopem po přeleštění.

Leptání

Dále je vzorek leptán tzv. lučavkou královskou tj. směsí kyseliny chlorovodíkové a kyseliny dusičné v poměru 3:1, za účelem vyvolání mikrostruktury. V leptacím činidle byl vzorek umístěn na 3 minuty.

Pozorování

Dále je vzorek snímán pod mikroskopem Olympus LEXT OLS5000. Na snímku lze rozlišit různou mikrostrukturu základního a svarového kovu.



Obrázek 17: Pohled na vzorek pod LEXT mikroskopem se zvětšením 226x.

3.2 Setup experimentu

3.2.1 AISI 304

V následujících tabulkách jsou popsány parametry laseru, které byly použity na jednotlivé svary při pulsním svařování oceli AISI 304. V experimentech s AISI 304 byly použity plechy o tloušťce 0,6 mm.

Zn.	U[V]	E[J]	t[ms]	D[mm]	f[Hz]	v[$mm.s^{-1}$]
A1	250	4,5	2	0,89	13	3
A2	230	4,5	2,5	0,89	13	3
A3	215	4,5	3	0,89	13	3
A4	205	4,5	3,5	0,89	13	3
A5	195	4,5	4	0,89	13	3
A6	188	4,5	4,5	0,89	13	3
A7	182	4,5	5	0,89	13	3

Tabulka 8: Setup při změně délky pulsu za fixní energie a frekvence.

Zn.	U[V]	E[J]	t[ms]	D[mm]	f[Hz]	v[$mm.s^{-1}$]
B1	195	3,4	3	0,89	13	3
B2	205	3,98	3	0,89	13	3
B3	215	4,51	3	0,89	13	3
B4	225	5,22	3	0,89	13	3
B5	235	5,85	3	0,89	13	3

Tabulka 9: Setup při změně energie pulsu za fixní délky a frekvence.

Zn.	U[V]	E[J]	t[ms]	f[Hz]	z[mm]	v[$mm.s^{-1}$]
C1	205	3,94	3	13	3	3
C2	205	3,94	3	13	4	3
C3	205	3,94	3	13	5	3
C4	205	3,94	3	13	6	3
C5	205	3,94	3	13	7	3
C6	205	3,94	3	13	8	3

Tabulka 10: Setup při změně ohniskové vzdálenosti

3.2.2 Titan

V následujících tabulkách jsou popsány parametry laseru, které byly použity na jednotlivé svary. V experimentech s titanem byly použity plechy o tloušťce 1 mm. Při těchto pokusech byl použit ochranný plyn argon s průtokem 11 l/min, z důvodu ochrany svaru před povrchovou oxidací a po svařování byly svary ihned očištěny technickým lihem.

Zn.	U[V]	E[J]	t[ms]	D[mm]	f[Hz]	v[$mm.s^{-1}$]
X1	180	2,6	3	0,89	13	3
X2	190	3,15	3	0,89	13	3
X3	200	3,7	3	0,89	13	3
X4	210	4,3	3	0,89	13	3
X5	220	5	3	0,89	13	3
X6	230	5,6	3	0,89	13	3
X7	240	6,3	3	0,89	13	3

Tabulka 11: Setup při změně energie pulsu za fixní délky a frekvence.

Zn.	U[V]	E[J]	t[ms]	D[mm]	f[Hz]	v[$mm.s^{-1}$]
Z1	253	5	2	0,89	13	3
Z2	233	5	2,5	0,89	13	3
Z3	220	5	3	0,89	13	3
Z4	208	5	3,5	0,89	13	3
Z5	198	5	4	0,89	13	3
Z6	190	5	4,5	0,89	13	3
Z7	185	5	5	0,89	13	3
Z8	180	5	5,5	0,89	13	3

Tabulka 12: Setup při změně délky pulsu za fixní energie a frekvence

3.2.3 Význam označení veličin

Význam jednotlivých značek:
U je budicí napětí, [U] = 1 V;
E je energie pulsu, [E] = 1 J;
t je délka pulsu, [t] = 1 ms;
f je frekvence, [f] = 1 Hz;
D je teoretický průměr svazku, [D] = 1 mm;
v je rychlost posunu, [v] = $mm.s^{-1}$;
P_p je vrcholový výkon, $[P_p]$ = 1 kW;
P_a je průměrný výkon, $[P_a]$ = 1 W;
Q_p je plošná hustota výkonu, $[Q_p] = 1\ \frac{kW}{cm^2}$;
D_h je šířka horního svaru, $[D_h]$ = 1 mm;
D_s je šířka horního svaru, $[D_s]$ = 1 mm;
h je hloubka svaru, [h] = 1 mm.

4 Výsledky

V praktické části jsme pozorovali dopady různých nastavení laseru na kvalitu svaru. Z důvodu hlubšího pochopení jsme zavedli další fyzikální veličiny a to:

Vrcholný výkon

Vrcholný výkon je fyzikální jednotka, jaký je nejvyšší výkon, který je po dobu pulsu do svaru dodán.

$$P_p = \frac{E}{t} \tag{2}$$

Průměrný výkon

Průměrný výkon ukazuje s jakou frekvencí mohu danou energii dodávat.

$$P_a = E.f \tag{3}$$

Plošná hustota výkonu

Plošná hustota výkonu neboli intenzita popisuje vrcholový výkon vztažený na cm^2.

$$Q_p = \frac{P_p}{\pi.(\frac{D}{2})^2} \tag{4}$$

Teoretický průměr svazku za ohniskem

Z důvodu ochrany optiky laseru se většinou materiál umisťuje za ohnisko. Rovnice 5 vyčísluje právě průměr svazku za ohniskem, kde D_{foc} je průměr svazku v ohnisku, BPP je tzv. „beam parametr product", který popisuje kvalitu svazku pevnolátkového laseru a udává se v mm.rad, z je vzdálenost od ohniska.

$$D = \left[D_{foc}^2 + \left(\frac{4.BPP.z}{D_{foc}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

V případě našeho laseru platí: D_{foc} = 0,76 mm, BPP = 0,022 mm. rad, pro sady A,B,X,Z bylo použito z = 4 mm.

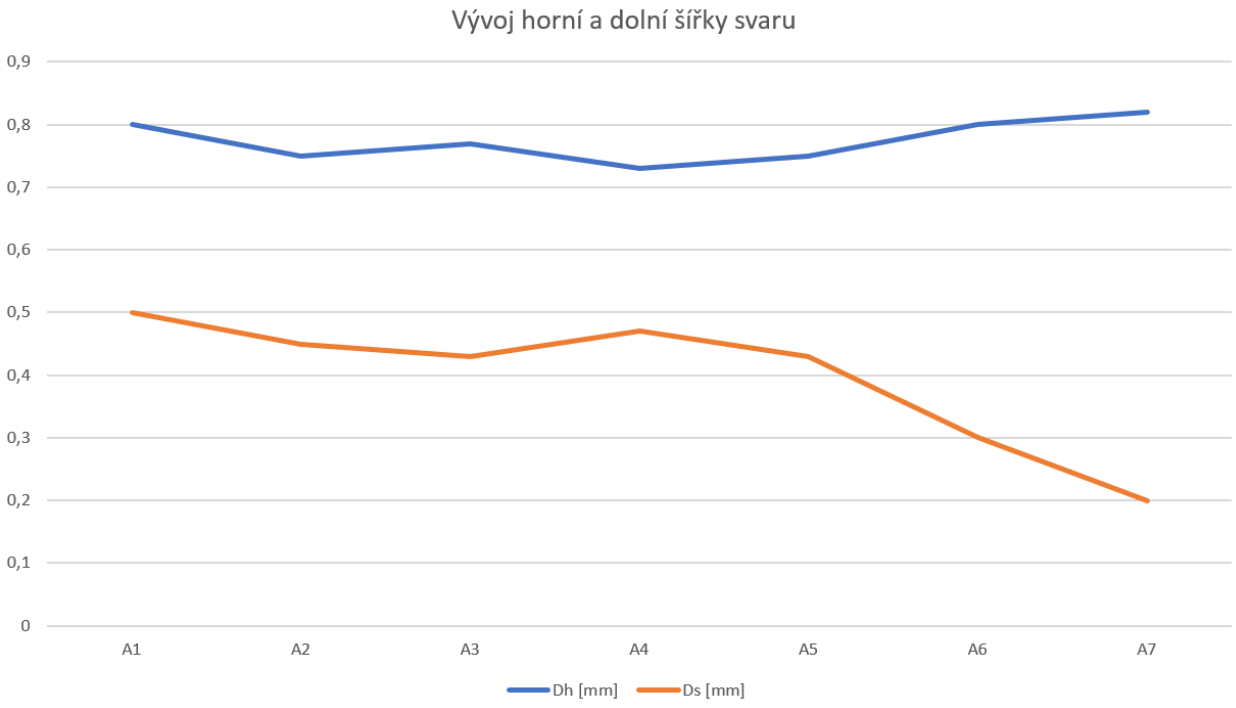
4.1 AISI 304

4.1.1 Vliv délky pulsu

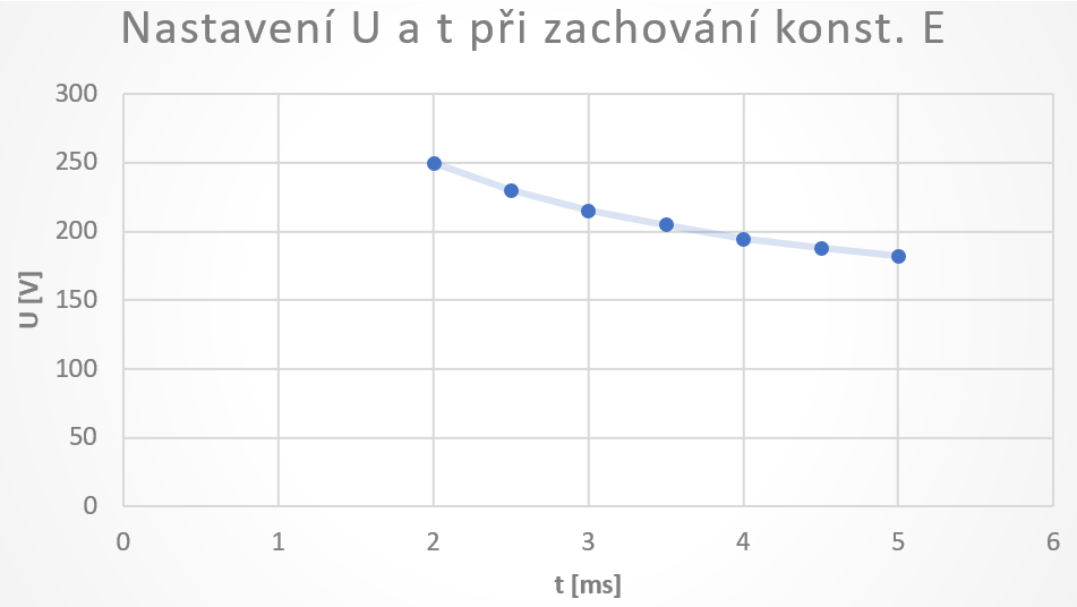
V případě změny délky pulsu jsme zafixovali energii pulsu a frekvenci.

Zn.	E[J]	t[ms]	P_p[kW]	$Q_p[\frac{kW}{cm^2}]$	P_a[W]	D_h [mm]	D_s [mm]
A1	4,5	2	2,3	3,6	59	0,80	0,50
A2	4,5	2,5	1,8	2,9	59	0,75	0,45
A3	4,5	3	1,5	2,4	59	0,77	0,43
A4	4,5	3,5	1,3	2,1	59	0,73	0,47
A5	4,5	4	1,1	1,8	59	0,75	0,43
A6	4,5	4,5	1,0	1,6	59	0,80	0,30
A7	4,5	5	0,9	1,4	59	0,82	0,20

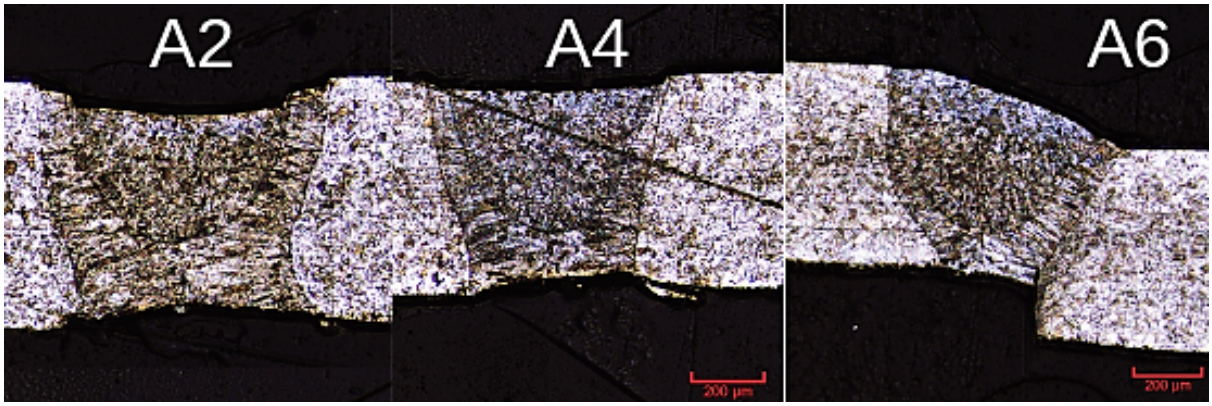
Tabulka 13: Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na délce pulsu u AISI 304.



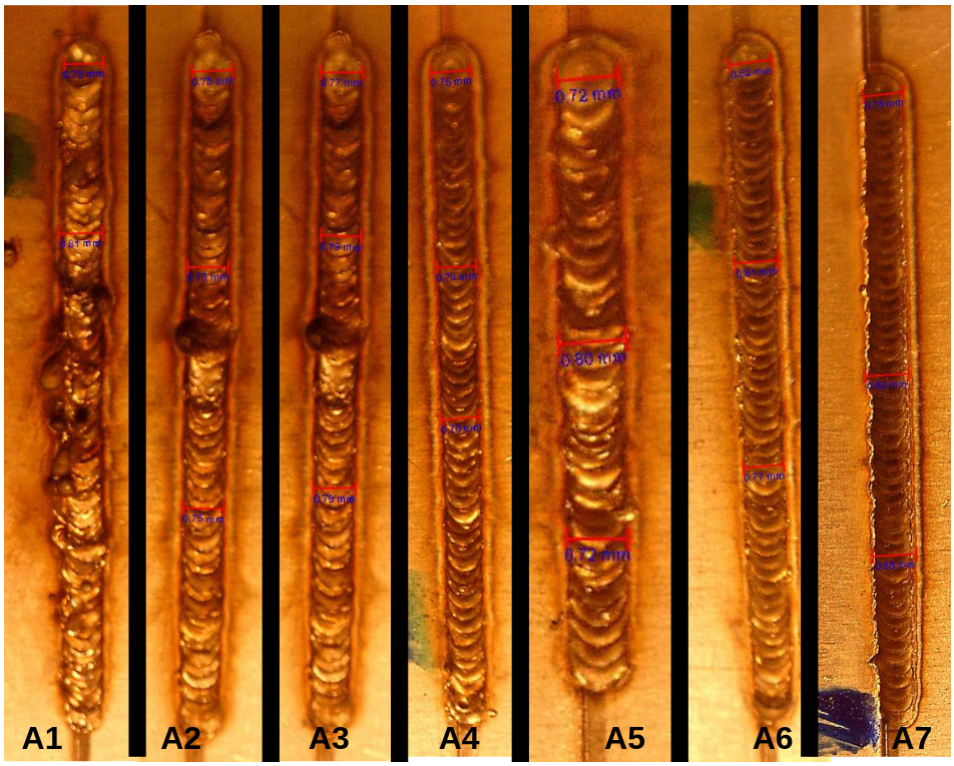
Obrázek 18: Graf vývoje horní a spodní šířky svaru u jednotlivých vzorků sady A



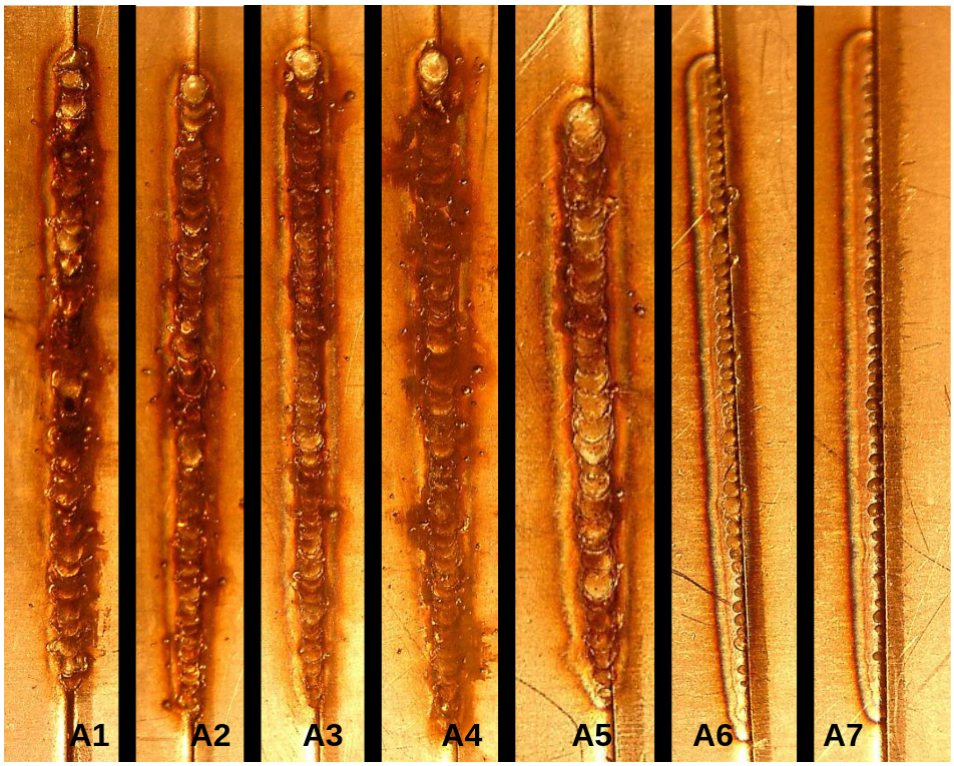
Obrázek 19: Graf nastavení U a t při zachování konstantní E



Obrázek 20: Fotografie příčných řezů svarů A2, A4, A6



Obrázek 21: Sada A, proměnná délka pulsu, horní strana



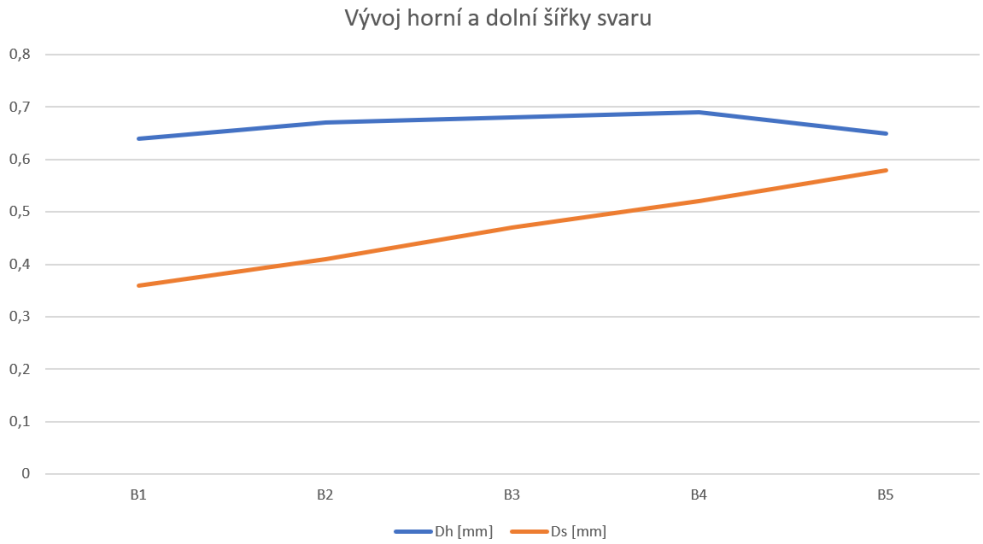
Obrázek 22: Sada A, proměnná délka pulsu, dolní strana

4.1.2 Vliv energie pulsu

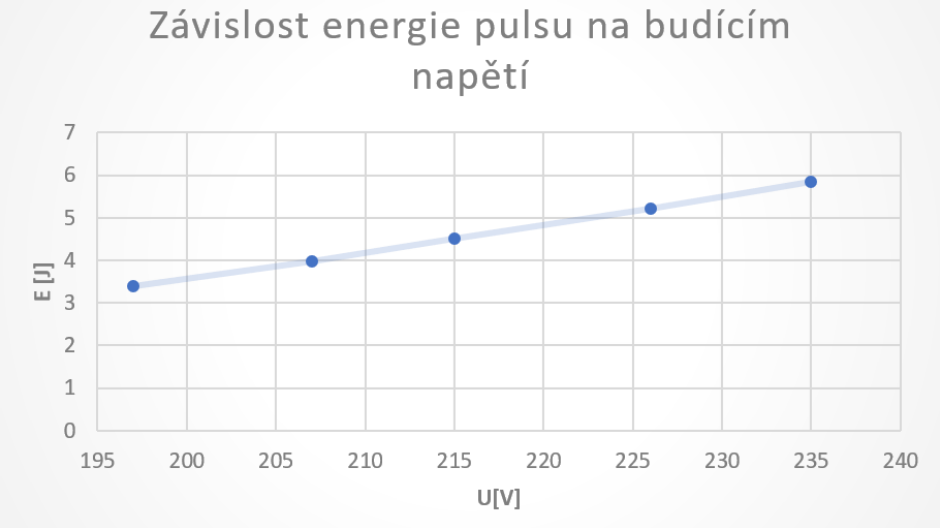
V případě změny energie jsme zafixovali délku pulsu na nejlepší výsledek a frekvenci.

Zn.	E[J]	t[ms]	P_p[kW]	P_a[W]	$Q_p[\frac{kW}{cm^2}]$	D_h [mm]	D_s [mm]
B1	3,40	3	1,13	44,20	1,82	0,64	0,36
B2	3,98	3	1,33	51,74	2,13	0,67	0,41
B3	4,51	3	1,50	58,63	2,42	0,68	0,47
B4	5,22	3	1,74	67,86	2,80	0,69	0,52
B5	5,85	3	1,95	76,05	3,13	0,65	0,58

Tabulka 14: Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na energii u AISI 304.

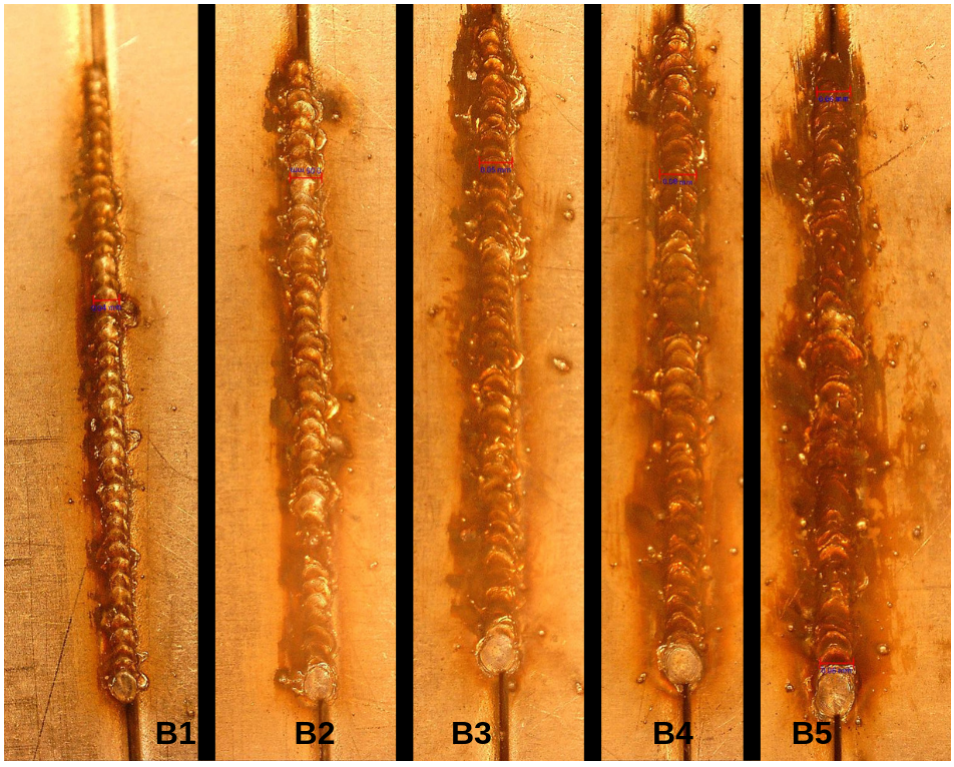


Obrázek 23: Graf vývoje horní a spodní šířky svaru u jednotlivých vzorků sady B

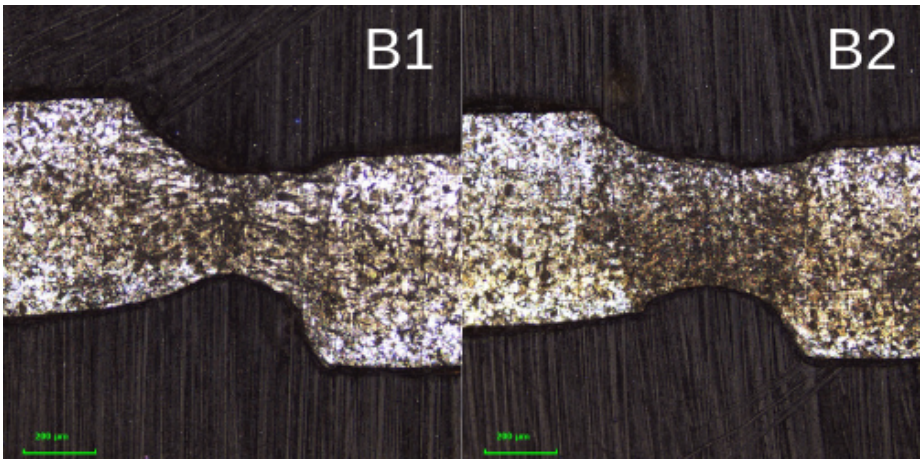


Obrázek 24: Graf závislosti energie pulsu na budícím napětí při konst. délce pulsu t = 3 ms

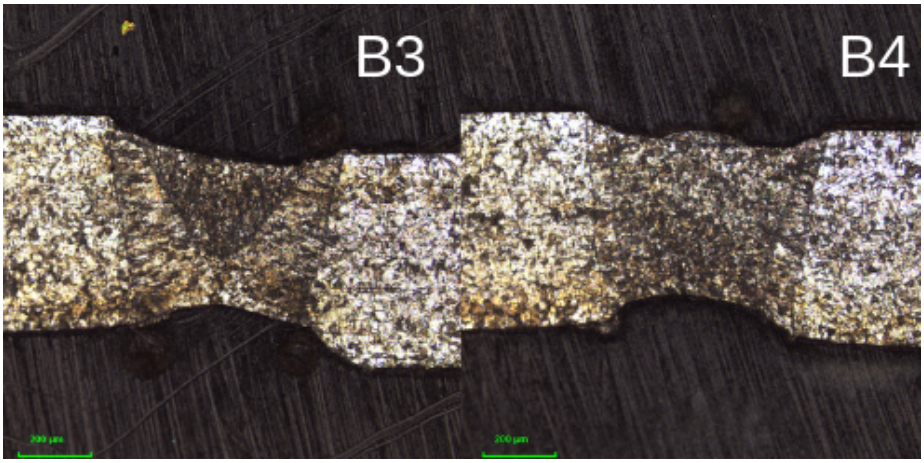
Obrázek 25: Sada B, proměnná energie pulsu, horní strana



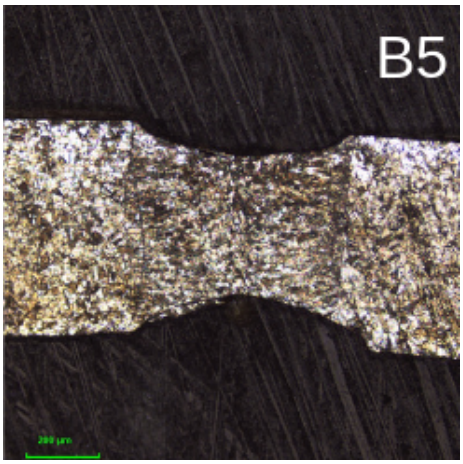
Obrázek 26: Sada B, proměnná energie pulsu, dolní strana



Obrázek 27: Fotografie příčných řezů svarů B1-B2



Obrázek 28: Fotografie příčných řezů svarů B3-B4



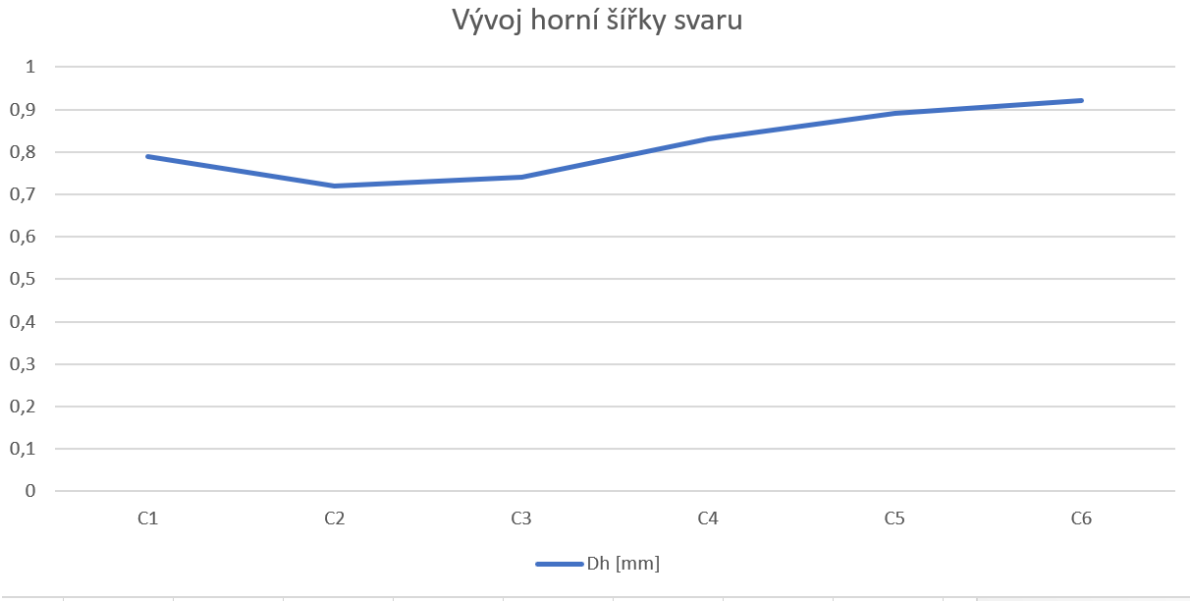
Obrázek 29: Fotografie příčného řezu svaru B5

4.1.3 Vliv vzdálenosti od ohniska

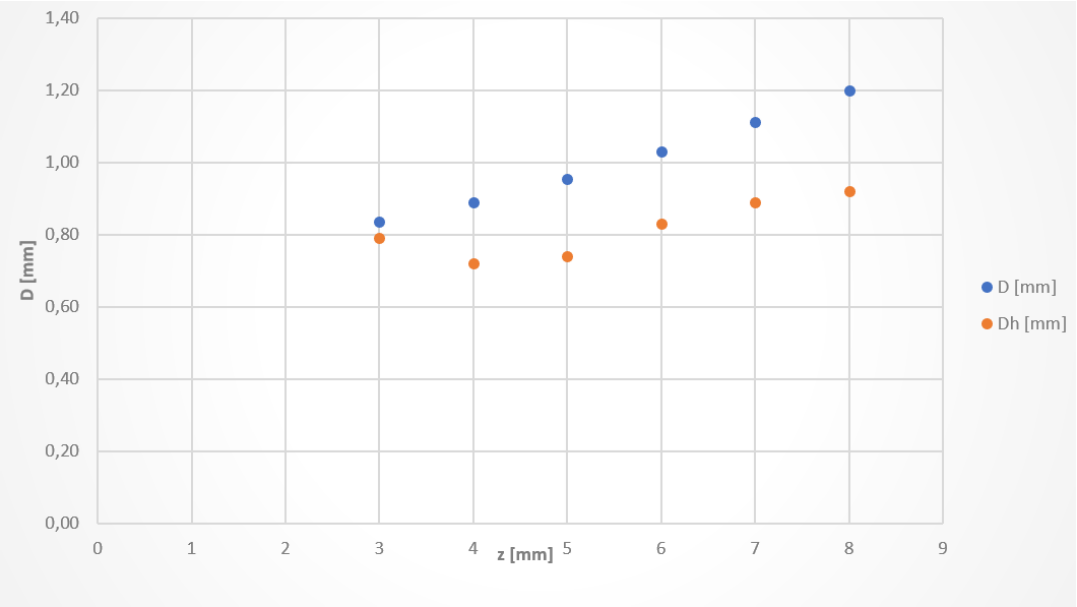
V tomto experimentu jsme se zabývali kvalitou svaru v závislosti na vzdálenosti ohniska od povrchu. Z důvodu ochrany optiky laseru jsme začali zkoumat od 3 mm. Tyto svaru jsme dělali technikou tzv. "baed on plate"(tj. aplikace na souvislý povrch).

Zn.	E[J]	t[ms]	P_p[kW]	$Q_p[\frac{kW}{cm^2}]$	P_a[W]	z[mm]	S[mm^2]	D_h [mm]
C1	3,94	3	1,31	2,55	51,22	3	2,19	0,79
C2	3,94	3	1,31	3,41	51,22	4	2,49	0,72
C3	3,94	3	1,31	2,97	51,22	5	2,87	0,74
C4	3,94	3	1,31	2,43	51,22	6	3,33	0,83
C5	3,94	3	1,31	1,98	51,22	7	3,88	0,89
C6	3,94	3	1,31	1,46	51,22	8	4,51	0,92

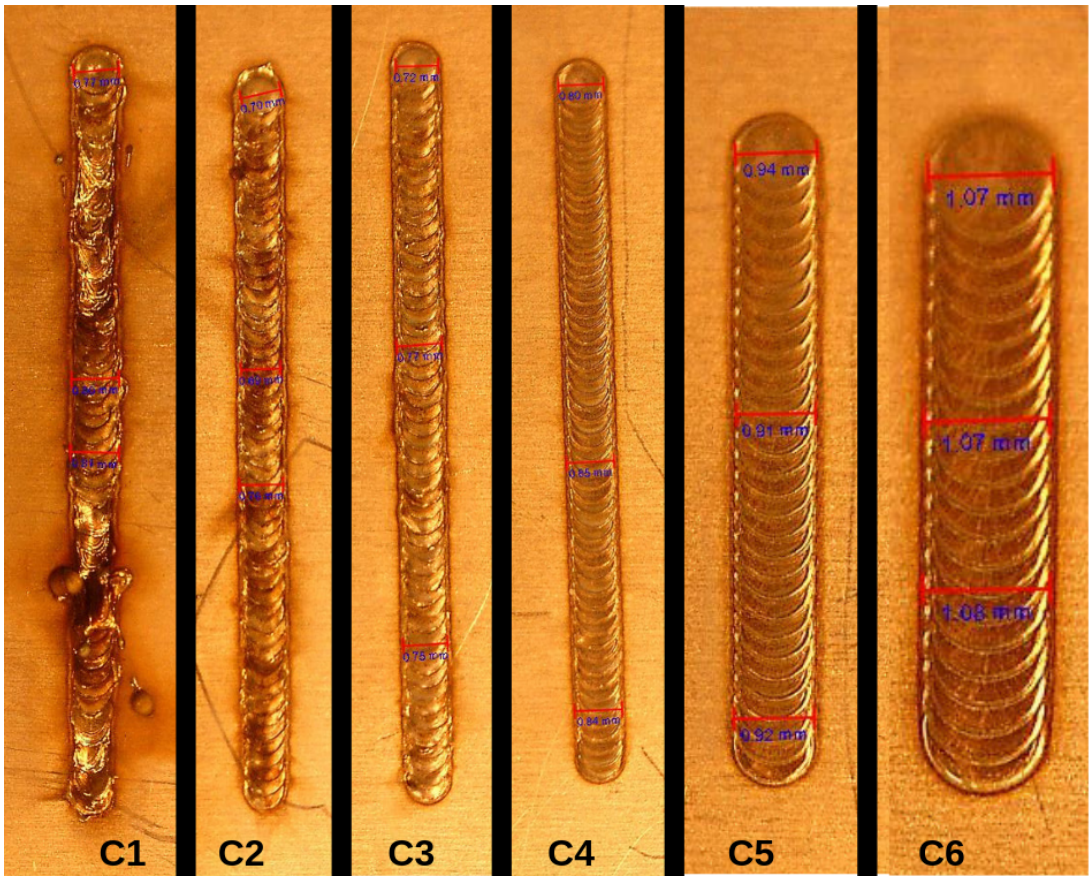
Tabulka 15: Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na vzdálenosti od ohniska u AISI 304.



Obrázek 30: Graf vývoje horní šířky u jednotlivých vzorků sady C



Obrázek 31: Porovnání hodnot teoretického průměru svazku (D) a průměru horní strany svaru (D_h) v závislosti na vzdálenosti od ohniska



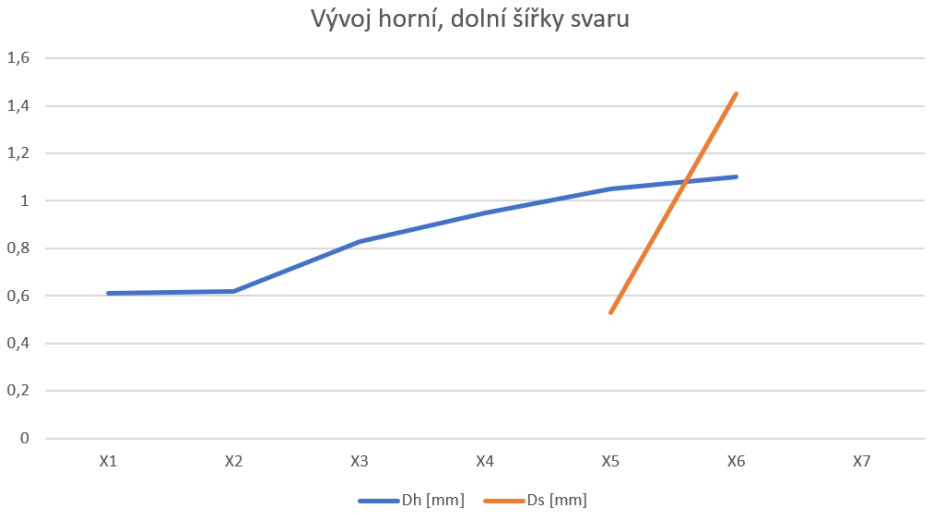
Obrázek 32: Sada C, proměnná vzdálenost od ohniska, horní strana

4.2 Titan

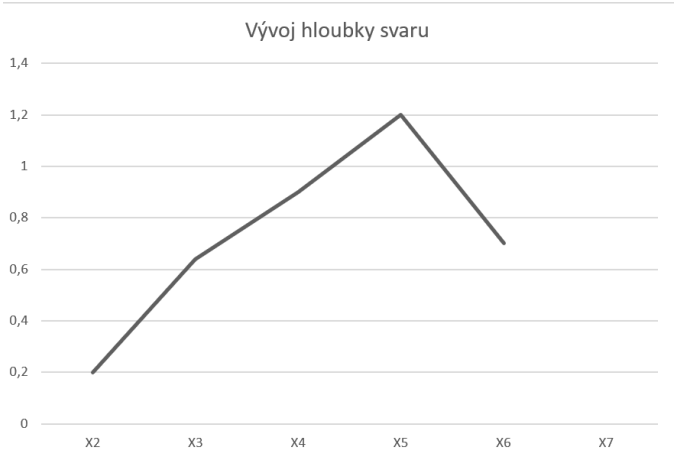
4.2.1 Vliv energie pulsu

Zn.	U[V]	E[J]	t[ms]	P_p[kW]	Q_p $[\frac{kW}{cm^2}]$	P_a[W]	D_h [mm]	D_s [mm]	h[mm]
X1	180	2,6	3	0,87	1,39	33,80	0,61	neprovařeno	neměřeno
X2	190	3,15	3	1,05	1,69	40,95	0,62	neprovařeno	0,2
X3	200	3,7	3	1,23	1,98	48,10	0,83	neprovařeno	0,64
X4	210	4,3	3	1,43	2,30	55,90	0,95	část. provařeno	0,9
X5	220	5	3	1,67	2,68	65,00	1,05	0,53	1,2
X6	230	5,6	3	1,87	3,00	72,80	1,1	1,45	0,7
X7	240	6,3	3	2,10	3,38	81,90	N/A	N/A	N/A

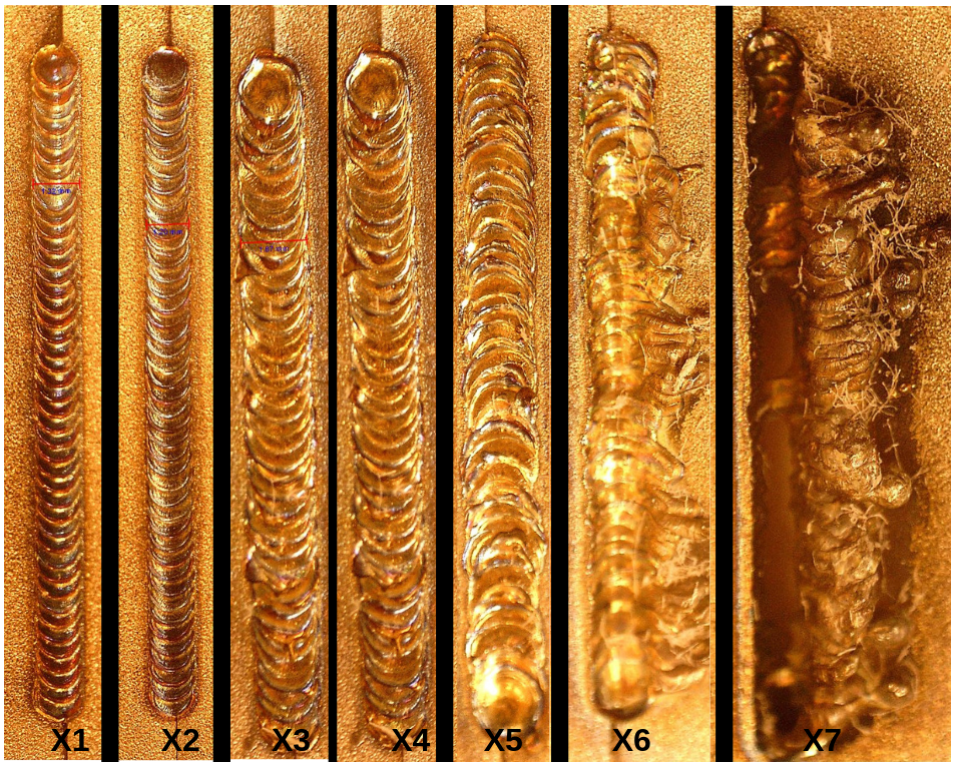
Tabulka 16: Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na energii u titanu.



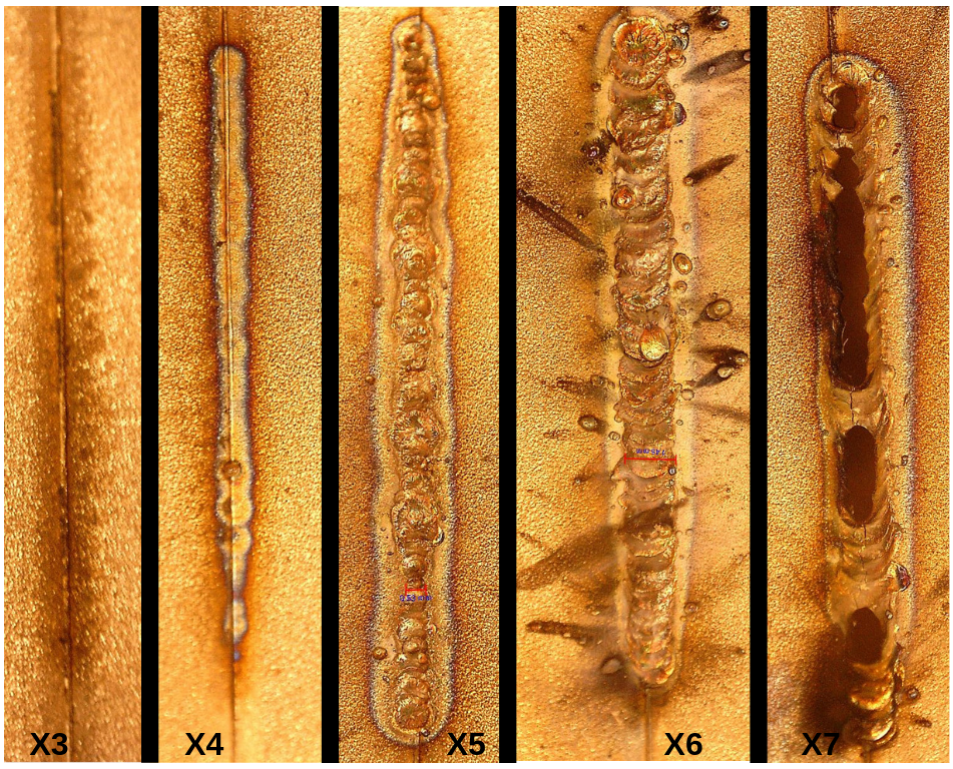
Obrázek 33: Graf vývoje horní a spodní šířky u jednotlivých vzorků sady X



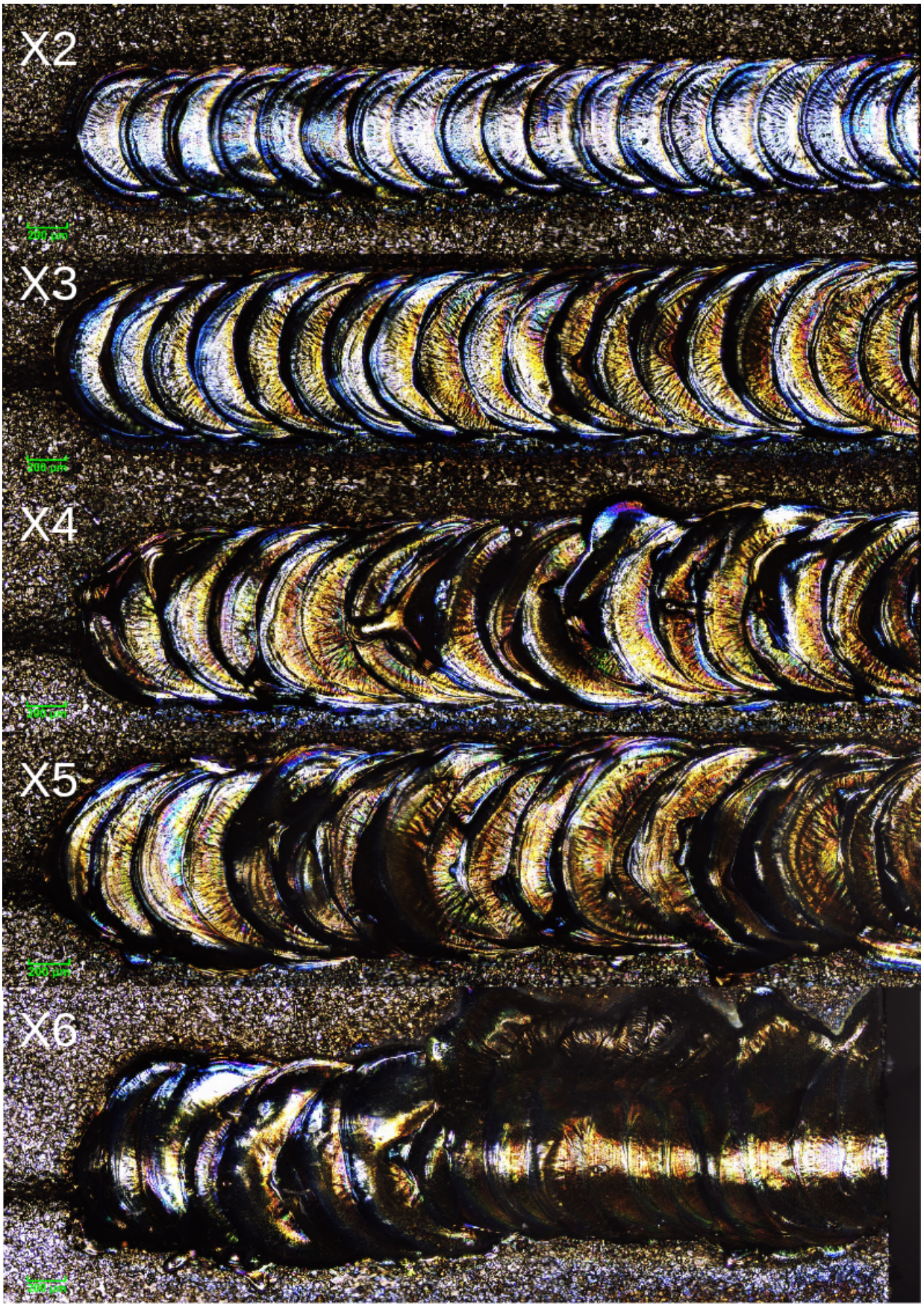
Obrázek 34: Graf vývoje hloubky u jednotlivých vzorků sady X



Obrázek 35: Sada X, proměnná energie pulsu, USB mikroskop, horní strana



Obrázek 36: Sada X, proměnná energie pulsu, USB mikroskop, dolní strana

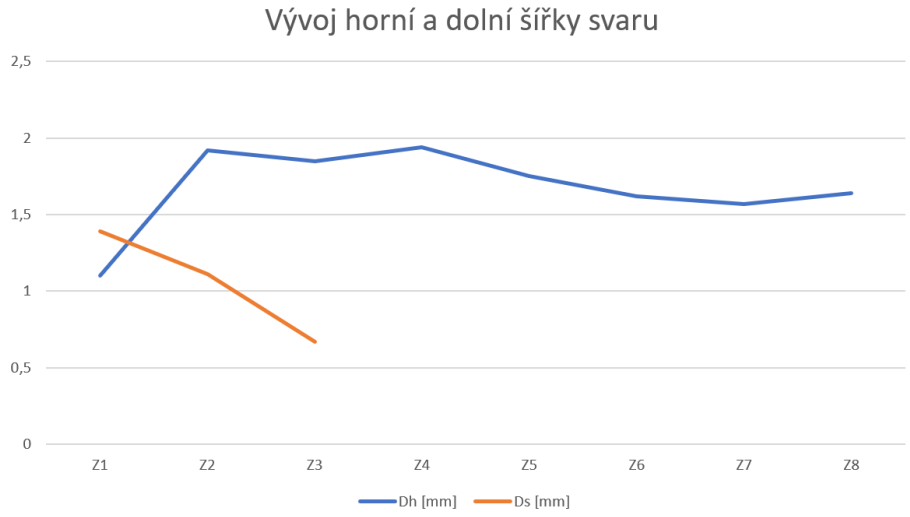


Obrázek 37: Sada X, proměnná energie pulsu, mikroskop LEXT, horní strana

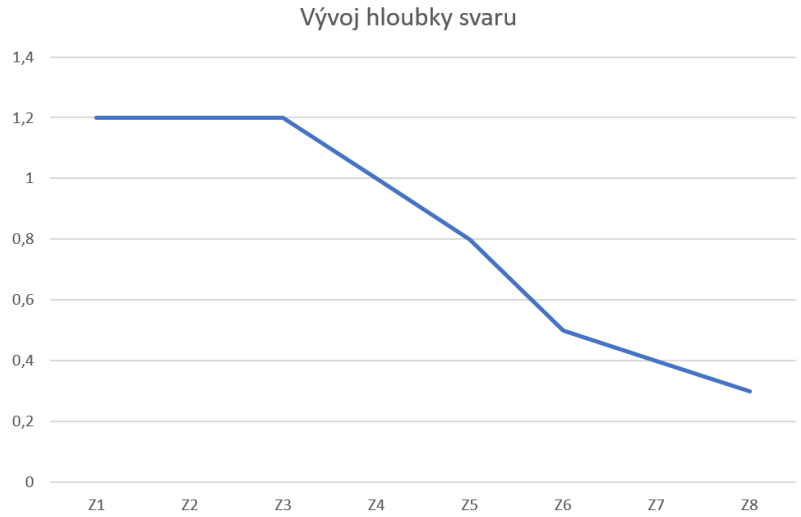
4.2.2 Vliv délky pulsu

Zn.	E[J]	t[ms]	P_p[kW]	P_a[W]	Q_p $[\frac{kW}{cm^2}]$	D_h [mm]	D_s [mm]	h[mm]
Z1	5	2	2,50	65	4,02	1,1	1,39	1,2
Z2	5	2,5	2,00	65	3,21	1,92	1,11	1,2
Z3	5	3	1,67	65	2,68	1,85	0,67	1,2
Z4	5	3,5	1,43	65	2,30	1,94	část. provařeno	1
Z5	5	4	1,25	65	2,01	1,75	neprovařeno	0,8
Z6	5	4,5	1,11	65	1,79	1,62	neprovařeno	0,5
Z7	5	5	1,00	65	1,61	1,57	neprovařeno	0,4
Z8	5	5,5	0,91	65	1,46	1,64	neprovařeno	0,3

Tabulka 17: Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na energii u titanu.

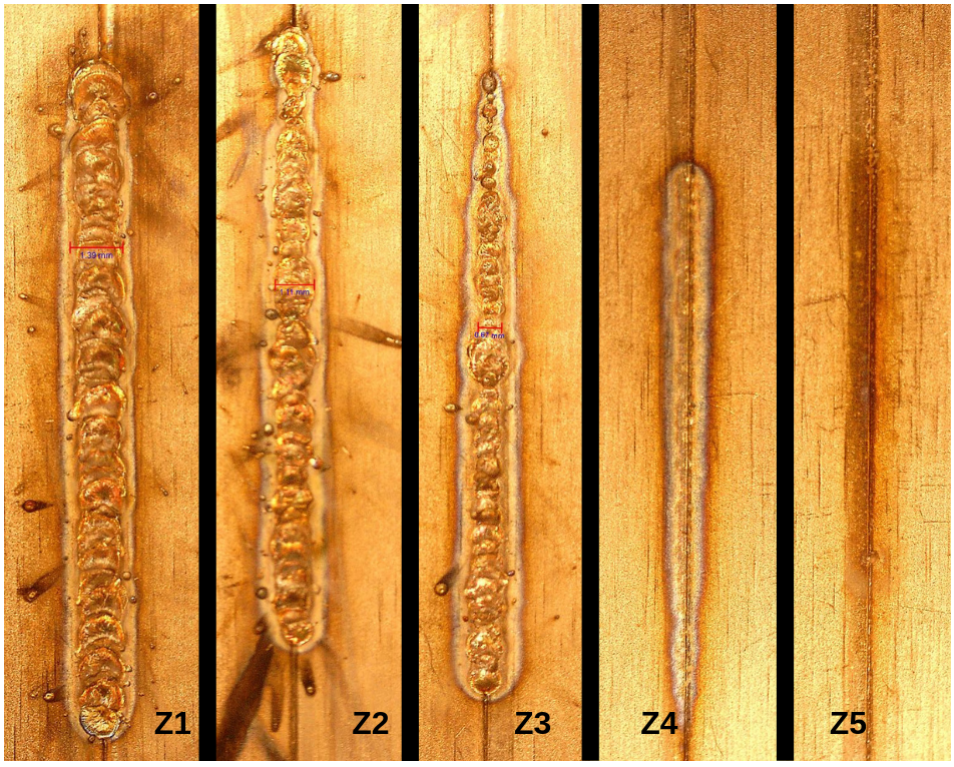


Obrázek 38: Graf vývoje horní a spodní šířky u jednotlivých vzorků sady Z

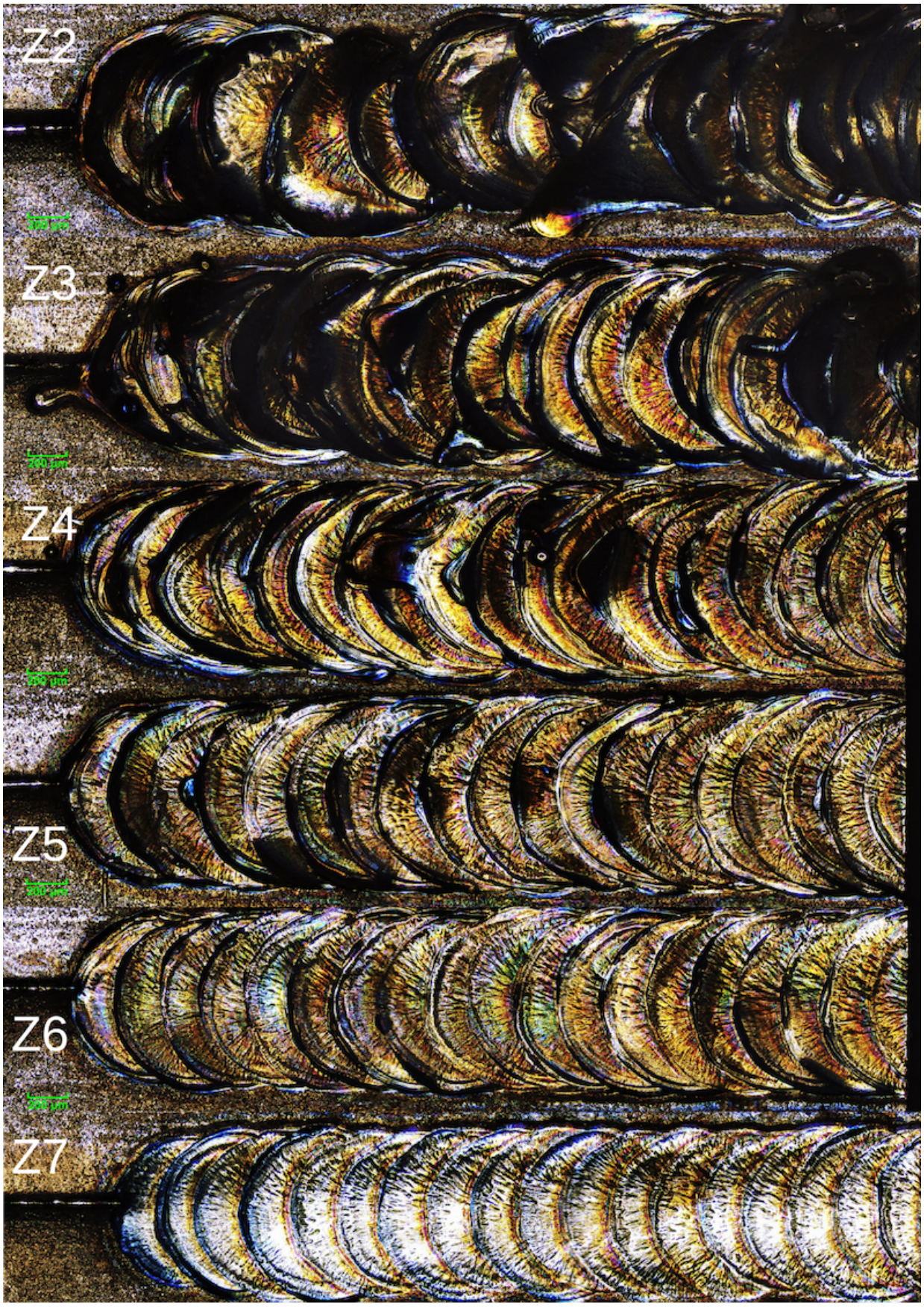


Obrázek 39: Graf vývoje hloubky u jednotlivých vzorků sady Z

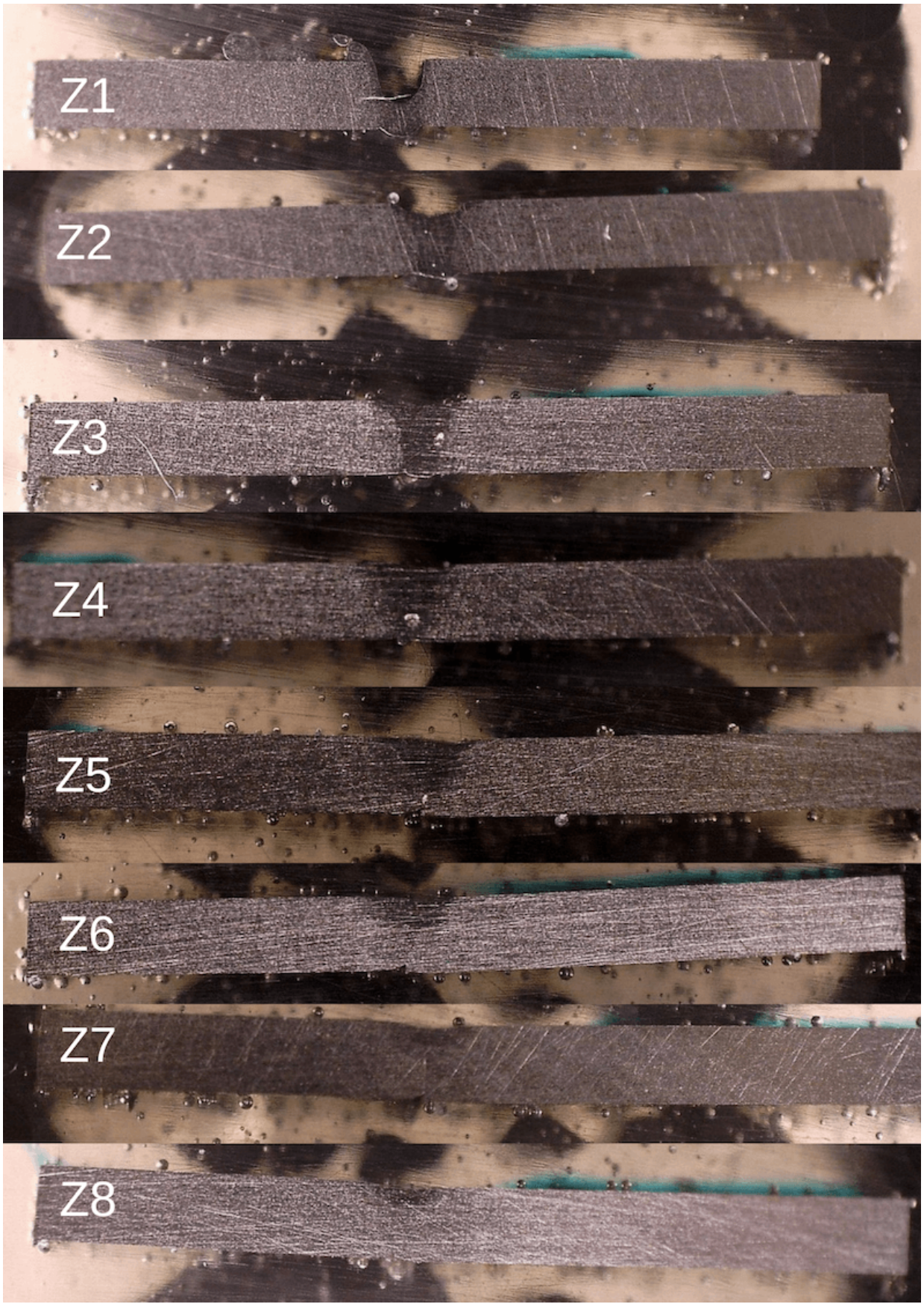
Obrázek 40: Sada Z, proměnná délka pulsu, horní strana



Obrázek 41: Sada Z, proměnná délka pulsu, spodní strana



Obrázek 42: Sada Z, proměnná délka pulsu, mikroskop LEXT, horní strana



Obrázek 43: Sada Z, metalografie, USB mikroskop

5 Diskuze

5.1 AISI 304

5.1.1 Vliv délky pulsu

Při zkoumání vlivu délky pulsu s rostoucí délkou pulsu od 2 ms do 5 ms za konstantní energie E = 4,5 J klesalo budicí napětí z 250 V na 182 V. Klesal také vrcholový výkon z 2,25 kW na 0,9 kW a plošná hustota výkonu z 3,6 $\frac{kW}{cm^2}$ na 1,4 $\frac{kW}{cm^2}$. Průměrný výkon byl 58,5 W a šířka horní strany kolísala mezi hodnotami 0,82 mm a 0,73 mm. Šířka spodní strany klesala od 0,5 mm po 0,2 mm. Teoretický průměr svazku byl 0,89 mm.

Na spodní straně svaru u krátkých pulsů docházelo k nadměrnému rozstřiku materiálu a u nejdelších nedocházelo k dostatečnému provaření materiálu. Na horní straně u dlouhých pulsů byla svarová housenka nejhladší a s klesající délkou pulsu se více zdrsňovala a postupně došlo i na rozstřik materiálu.

Optimálním výsledkem byl vybrán svar **A3 s t = 3 ms**, kdy za úplného provaření nedošlo k roztřiku materiálu.

5.1.2 Vliv energie pulsu

Při zkoumání vlivu energie pulsu s rostoucí energií pulsu za konstantní délky t = 3 ms rostlo budicí napětí z 195 V na 235 V. Rostl také vrcholový výkon z 1,13 kW na 1,95 kW a průměrný výkon z 44,20 W na 76,05 W. Šířka horního svaru kolísala mezi 0,64 mm a 0,69 mm a šířka spodního svaru stoupala od 0,4 mm do 0,6 mm. Hodnota plošné hustoty výkonu rostla od 1,82 $\frac{kW}{cm^2}$ na 3,13 $\frac{kW}{cm^2}$. Teoretický průměr svazku byl 0,84 mm a frekvence 13 Hz.

Na spodní i horní straně svaru se s rostoucí energií stupňovala i drsnost svaru, šířka tepelně ovlivněné zóny a také se u nejvyšších energií došlo i k rozstřiku materiálu. U nejnižší energie nebyl svar dostatečně provařen.

Optimálním výsledkem byl vybrán svar **B2 s E = 3,98 J**, kdy za úplného provaření nedošlo k rozstřiku materiálu.

5.1.3 Vliv vzdálenosti od ohniska

Při zkoumání vlivu vzdálenosti od ohniska byla konstantní energie E = 3,94 J, budicí napětí U = 205 V, délky pulsu t = 3 ms, a tedy i vrcholového výkonu $P_p = 1,31$ kW a průměrného výkonu $P_a = 51,22$ W. Teoretický průměr svazu se pohyboval mezi 0,84 mm a 1,20 mm. Frekvence byla 13 Hz. Vzdálenost od ohniska rostla z 3 mm na 8 mm.

Protože svary byly vyhotoveny technikou baed on plate, tedy aplikací na souvislý materiál, zadní strana svaru se tedy nevyhodnocuje. U nejnižší vzdálenosti od ohniska docházelo k rozstřiku materiálu a se vzrůstající vzdáleností se svary zjemňovaly a rozšiřovaly.

Optimálním svarem byl vybrán svar **C2 s z = 4 mm**.

5.2 Titan

5.2.1 Vliv energie pulsu

Při zkoumání vlivu energie pulsu na svařování titanu byla zvolena konstantní délka pulsu t = 3 ms a energie rostla z 2,6 J na 6,3 J spolu z budicím napětím ze 180 V na 240 V, a tedy rostl i vrcholový výkon z 0,87 kW na 2,10 kW, průměrný výkon ze 33,80 W na 81,90 W a měrná hustota výkonu z 1,39 $\frac{kW}{cm^2}$ na 3,38 $\frac{kW}{cm^2}$. Šířka horního svaru kolísala mezi 1,15 mm a 1,87 mm a svar s nejvyšší energií nebyl svařen, nýbrž rozřezán. Svary s nejnižšími energiemi nebyly dostatečně hluboké, aby na zadní straně vznikl svar, svar s nejvyšší energií nebyl svařen, nýbrž rozřezán a u zbylých svarů rostla šířka zadní strany svaru z 0,53 mm na 1,45 mm. Frekvence byla 13 Hz a teoretický průměr svazku byl 0,89 mm. Hloubka svaru rostla z 0,2 mm na 1,2 mm.

Svary s nejnižšími energiemi nebyly provařeny a s u nejvyšší energie došlo k odnosu svarového materiálu a plechy se nespojily. U vyšších energií došlo k rozstřiku materiálu a se vzrůstající energií se svary zdrsňovaly.

Optimálním svarem byl vybrán svar **X5 s E = 5 J**, kdy došlo k úplnému provaření bez rozstřiku materiálu.

5.2.2 Vliv délky pulsu

Při zkoumání vlivu délky pulsu za konstantní energie E = 5 J rostla délka pulsu ze 2 ms na 5,5 ms a naopak klesaly budicí napětí z 253 V na 180 V, vrcholový výkon z 2,50 kW na 0,91 kW a také měrná hustota výkonu z 4,02 $\frac{kW}{cm^2}$ na 1,46 $\frac{kW}{cm^2}$. Průměrný výkon byl konstantní $P_a = 65,0$ W. Šířka horního svaru rostla z 1,1 mm na 1,64 mm. Šířka spodního svaru klesala z 1,39 mm na 0,67 mm a u nejvyšších délek pulsů nedošlo k provaření materiálu. Frekvence byla 13 Hz a teoretický průměr svazku byl 0,89 mm.

Svary s nejdelšími délkami pulsů nebyly dostatečně provařeny a u nejkratších délek zase došlo k rozstřiku materiálu. Se vzrůstající délkou pulsu se svar zjemňuje. I přesto, že na tento experiment, byla použita titanová superslitina Ti6Al-V a ne čistý titan jako v předchozím experimentu, jsou optimální parametry využitelné na oba dva materiály, protože mají podobné vlastnosti.

Optimálním svarem byl vybrán svar **Z3 s t = 3 ms**, kdy došlo k úplnému provaření s minimálním rozstřikem materiálu.

6 Závěr

Ve své práci se zabývám problematikou pulsního laserového svařování se zaměřením na délku a energii pulsu a vzdálenost od ohniska u oceli AISI 304 a na délku a energií pulsu u titanu.

Cílem práce bylo nalézt optimální hodnoty pro zmíněné parametry pulsního laserového svařování. Ty byly vybrány na základě vizuálního posouzení svaru a na základě metalografické analýzy příčných řezů. Požadovanými vlastnostmi byl minimální rozstřik materiálu, důkladné provaření a vzhled svaru. Vedle svarů byly také pozorovány také různé závislosti mezi různými parametry.

V teoretické části čtenáře seznamuji s základními fakty pojící se s historií laseru, principu fungování, konstrukcí, využívanými variantami, dále také s bezpečností a ochrany zdraví při práci s laserem. V závěru teoretické práce seznamuji čtenáře se základy svařování a potenciálními problémy.

V úvodu praktické části představuji čtenáři použité materiály, laserové zařízení, pozorovací techniku, analýzu vzorků. Dále pak parametry laseru použité k vyhotovení jednotlivých svarů. Na závěr prezentuji dosažené výsledky, které v diskuzi komentuji.

Výsledky přinášejí čtenáři přehled o postupu optimalizace parametrů laserového svařování a seznamuje jej s optimálními parametry pro plechy s šířkou 0,6 mm a 1,2 mm. Práce prokázala, že stanovené parametry lze použít i na materiály obdobného složení a fyzikálních vlastností.

Tyto výsledky lze použít v různých průmyslovém odvětvích např. v leteckém, automobilovém nebo strojírenském průmyslu při svařování různých ocelových nebo titanových součástí. Laserové svařování splňuje vysoké nároky v ohledech kvality, rychlosti, efektivity a preciznosti, které firmy požadují. Využití laserového svařování ve výrobě ji zrychluje, zefektivňuje, a tedy zlevňuje. Hlavní nevýhodou je vyšší úvodní investice. V budoucnu se snad dočkáme nahrazení tradičních metod např. odporového nebo obloukového svařování svařováním laserovým a tato práce usnadní jeho implementaci.

Přínosem práce je samotné stanovení optimálních parametrů laserového svařování oceli AISI 304 a titanu, dále práce demonstrovala způsob optimalizace laserového svařování, který mohou použít strojírenské společnosti, budou-li chtít optimalizovat parametry laserového svařování ve svých výrobních procesech.

Tato práce je vysázena programem LaTeX.

Seznam obrázků

1 Grafy počtu částic v jednotlivých energetických hladinách při standardní populaci a inverzi populace (Převzato z [3]) 8
2 Schéma absorpce fotonu v dvouhladinovém systému (převzato z [3]) 8
3 Schéma čerpacího zařízení a aktivního prostředí (Převzato a upraveno z [4]) 9
4 Schéma stimulované emise fotonu v dvouhladinovém systému (Převzato z [3]) . . . 9
5 Zapínání laseru (Převzato z [2]) 10
6 Základní typy rezonátorů (Převzato z [5]) 11
7 Koherence záření (Převzato z [2]) 12
8 Závislost interakčního času a energie na metodě zpracování. (Převzato z [2]) 15

9 Optický systém laseru LASAG. (Převzato a upraveno [4]) 20
10 Nastavení pracovního materiálu na x-y stole ve speciálním úchytu pod hlavou laseru. 21
11 Náklon hlavy laseru. 21
12 Plech připravený k řezání 22
13 Vzorky ve formě 22
14 Pohled na vzorek pod USB mikroskopem. Brusný kotouč P-1200, směr původní. . 23
15 Pohled na vzorek pod USB mikroskopem. Brusný kotouč P-2400, směr kolmý. . . . 23
16 Pohled na vzorek pod USB mikroskopem po přeleštění. 24
17 Pohled na vzorek pod LEXT mikroskopem se zvětšením 226x. 24

18 Graf vývoje horní a spodní šířky svaru u jednotlivých vzorků sady A 28
19 Graf nastavení U a t při zachování konstantní E 29
20 Fotografie příčných řezů svarů A2, A4, A6 29
21 Sada A, proměnná délka pulsu, horní strana 30
22 Sada A, proměnná délka pulsu, dolní strana 30
23 Graf vývoje horní a spodní šířky svaru u jednotlivých vzorků sady B 31
24 Graf závislosti energie pulsu na budícím napětí při konst. délce pulsu t = 3 ms . . 31
25 Sada B, proměnná energie pulsu, horní strana 32
26 Sada B, proměnná energie pulsu, dolní strana 32
27 Fotografie příčných řezů svarů B1-B2 33
28 Fotografie příčných řezů svarů B3-B4 33
29 Fotografie příčného řezu svaru B5 33
30 Graf vývoje horní šířky u jednotlivých vzorků sady C 34
31 Porovnání hodnot teoretického průměru svazku (D) a průměru horní strany svaru (D_h) v závislosti na vzdálenosti od ohniska 35
32 Sada C, proměnná vzdálenost od ohniska, horní strana 35
33 Graf vývoje horní a spodní šířky u jednotlivých vzorků sady X 36
34 Graf vývoje hloubky u jednotlivých vzorků sady X 36

35 Sada X, proměnná energie pulsu, USB mikroskop, horní strana 37
36 Sada X, proměnná energie pulsu, USB mikroskop, dolní strana 37
37 Sada X, proměnná energie pulsu, mikroskop LEXT, horní strana 38
38 Graf vývoje horní a spodní šířky u jednotlivých vzorků sady Z 39
39 Graf vývoje hloubky u jednotlivých vzorků sady Z 39
40 Sada Z, proměnná délka pulsu, horní strana 40
41 Sada Z, proměnná délka pulsu, spodní strana 40
42 Sada Z, proměnná délka pulsu, mikroskop LEXT, horní strana 41
43 Sada Z, metalografie, USB mikroskop 42

Seznam tabulek

1 Hmotnostní obsah složek AISI304 [12] 18
2 Fyzikální vlastnosti AISI304 [13] 18
3 Chemické složení Ti CP Gr. 1 [14] 19
4 Fyzikální vlastnosti Ti CP Gr. 1 [14] 19
5 Chemické složení titanové slitiny Ti6Al-4V [15] 19
6 Fyzikální vlastnosti Ti6Al-4V [16] 19
7 Nastavitelné parametry laseru LASAG 246 22
8 Setup při změně délky pulsu za fixní energie a frekvence. 25
9 Setup při změně energie pulsu za fixní délky a frekvence. 25
10 Setup při změně ohniskové vzdálenosti 25
11 Setup při změně energie pulsu za fixní délky a frekvence. 26
12 Setup při změně délky pulsu za fixní energie a frekvence 26

13 Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na délce pulsu u AISI 304. 28
14 Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na energii u AISI 304. . 31
15 Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na vzdálenosti od ohniska u AISI 304. 34
16 Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na energii u titanu. . . . 36
17 Tabulka ukazatelů při zkoumání kvality svaru v závislosti na energii u titanu. . . . 39

Literatura

[1] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky.* Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01108-9.

[2] DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. *Laser fabrication and machining of materials.* New York, N.Y.: Springer, c2008. ISBN 978-038-7723-440.

[3] CHMELÍČKOVÁ, Hana. Laserové technologie v praxi I.: Přednáška č. 1. Portál moderní fyziky [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_1prez.pdf.

[4] Operator Instructions FLS, KLS and SLS Laser Sources. Directed Light [online]. Postfach: LASAG, 2008 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://directedlight.com/wp-content/uploads/Operation-Manual-FLS-KLS-SLS-121508.pdf.

[5] CHMELÍČKOVÁ, Hana. Laserové technologie v praxi I.: Přednáška č. 2. Portál moderní fyziky [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_2prez.pdf.

[6] *Zákon o ochraně zdraví a o změně některých souvisejících zákonů.* In: . Praha: Sbírka zákonů, 2000, ročník 2000, číslo 258.

[7] Nařízení vlády 291/2015 Sb. ze dne 5. října 2015 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

[8] ČSN EN 60825-1. *Bezpečnost laserových zařízení: Část 1: Klasifikace zařízení a požadavky.* Třetí edice. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[9] HRDLIČKOVÁ, Dobroslava. *Strojírenská technologie III pro strojírenské učební obory.* Vyd. 5., upr. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 8085920670.

[10] NEUMANN, Heunz. *Teorie svařování a pájení: Část 1: Tavné svařování.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 9788076941719.

[11] Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace a použití, zpracování, svařování a možné korozi. *Italinox* [online]. 2015, 2015 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2.

[12] AISI Type 304 Stainless Steel. *ASM Aerospace Specification Metals Inc.* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a.

[13] 1.4301 Bar and Section. *Aalco* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Stainless-Steel-14301-Bar-and-Section_34.ashx.

[14] *Facts and figures for commonly used titanium alloys* [online]. Institute for Energy Technology [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: https://www.ife.no/en/en/ife/departments/materials_and_corrosion_tech/files/facts-and-figures-for-commonly-used-titanium-alloys.

[15] *Ti 6Al-4V ELI* [online]. Fort Wayne: Fort Wayne Metals, 2019 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.fwmetals.com/materials/titanium/ti-6al-4v-eli/Ti 6Al-4V ELI [online]. Fort Wayne: Fort Wayne Metals, 2019 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://www.fwmetals.com/materials/titanium/ti-6al-4v-eli/.

[16] Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed *ASM Aerospace Specification Metals Inc.* [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641.